

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ  
ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ  
ΤΜΗΜΑ ΓΕΩΠΟΝΙΑΣ ΦΥΤΙΚΗΣ ΚΑΙ ΖΩΙΚΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

**ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΩΝ  
ΑΓΡΟΜΕΤΕΩΡΟΛΟΓΙΚΗΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ**

**ΣΤΑΜΠΟΥΛΗΣ Θ. ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ**

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: **Ν.Ρ. ΔΑΛΕΖΙΟΣ**  
ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ

ΒΟΛΟΣ 2001



**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ**  
**ΥΠΗΡΕΣΙΑ ΒΙΒΛΙΟΘΗΚΗΣ & ΠΛΗΡΟΦΟΡΗΣΗΣ**  
**ΕΙΔΙΚΗ ΣΥΛΛΟΓΗ «ΓΚΡΙΖΑ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ»**

Αριθ. Εισ.: 21/Δ

Ημερ. Εισ.: 04-08-2003

Δωρεά:

Ταξιθετικός Κωδικός: ΠΤ - ΓΦΖΠ

2001

ΣΤΑ

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ  
ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ



004000070994

**ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ ΠΤΥΧΙΑΚΗΣ**  
**ΔΙΑΤΡΙΒΗΣ**

ΥΠΕΥΘΥΝΟΣ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ :

**ΝΙΚΟΛΑΟΣ Ρ. ΔΑΛΕΖΙΟΣ**  
**ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ**

ΜΕΛΗ ΤΗΣ ΕΠΙΤΡΟΠΗΣ :

**ΤΖΩΡΤΖΙΟΣ ΣΤΕΡΓΙΟΣ**  
**ΑΝΑΠΛΗΡΩΤΗΣ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ**

**ΔΑΝΑΛΑΤΟΣ ΝΙΚΟΛΑΟΣ**  
**ΕΠΙΚΟΥΡΟΣ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ**

## ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Ο καιρός και το κλίμα αποτελούν δυο καθοριστικούς παράγοντες στην αύξηση και ανάπτυξη των φυτών και η σημασία τους είναι ιδιαίτερα κρίσιμη στην περίπτωση των προγνώσεων της παραγωγής των γεωργικών καλλιεργειών. Οι μετεωρολογικοί παράγοντες, που εμπλέκονται στη διαμόρφωση του μικροκλίματος μιας περιοχής, προσδιορίζουν χρονικά καθοριστικές φυσιολογικές διεργασίες των φυτών οι οποίες ως ένα μεγάλο βαθμό καθορίζουν την παραγωγή της καλλιέργειας.

Στην παρούσα εργασία επιχειρείται μια ανασκόπηση των Μεθοδολογιών Αγρομετεωρολογικής Προσομοίωσης. Το αντικείμενο αυτής της εργασίας είναι να παράσχει μια εικόνα για το περιεχόμενο των μεθόδων πρόγνωσης συγκομιδής. Αρκετές μέθοδοι και μοντέλα διακρίνονται και παρουσιάζονται με έναν συνθετικό τρόπο στα επόμενα κεφάλαια. Η βασική διάκριση αυτών των μεθόδων είναι ο διαχωρισμός τους σε επιχειρησιακές μεθόδους και προσδοκώμενες ή μεθόδους υπό ανάπτυξη.

Η εργασία πραγματοποιήθηκε στο Εργαστήριο Αγρομετεωρολογίας από τον φοιτητή Σταμπουλή Θ. Δημήτριο στα πλαίσια της πτυχιακής διατριβής για την απόκτηση του πτυχίου του Τμήματος Γεωπονίας Φυτικής και Ζωικής Παραγωγής.

Από τη θέση αυτή κρίνεται απαραίτητο να εκφραστούν ευχαριστίες στον υπεύθυνο επιβλέποντα Καθηγητή Ν.Ρ. Δαλέζιο για την καθοδήγησή του και την παροχή πολύτιμων γνώσεων και κατευθυντηρίων γραμμών για τη συγγραφή της παρούσας εργασίας.

Επίσης, ευχαριστίες εκφράζονται στους Τζώρτζιο Σ. Αναπληρωτή Καθηγητή και Δαναλάτο Ν. Επίκουρο Καθηγητή.

Βόλος, Οκτώβριος 2001

Σταμπουλής Θ. Δημήτριος



# ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 – ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....</b>	<b>1</b>
1.1 Φάσεις και Κύκλος Ζωής των Φυτών.....	3
1.2 Αύξηση και Ανάπτυξη.....	7
1.3 Συντελεστές Ανάπτυξης των Φυτών.....	7
1.4 Ποσοτική Έκφραση Αύξησης-Ανάπτυξης στην Σχέση Καλλιέργεια - Καιρός.....	13
1.5 Βιβλιογραφία Κεφαλαίου 1.....	14
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 – ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ-ΜΟΝΤΕΛΑ.....</b>	<b>16</b>
2.1 Γενικές Αρχές της Προσομοίωσης.....	16
2.1.1 Θεωρητική Τεκμηρίωση του Φυσικού Φαινομένου.....	16
2.1.2 Λογική Ανάλυση του Ομοιώματος.....	16
2.1.3 Συνταγή Επίλυσης του Ομοιώματος.....	18
2.1.4 Σχεδίαση του Ομοιώματος σε Πηγαία Μορφή.....	18
2.1.5 Μετατροπή του Πηγαίου σε Εκτελέσιμο Κώδικα.....	20
2.1.6 Δημιουργία ή Επιλογή Κατάλληλης Βάσης Δεδομένων.....	21
2.1.7 “Τρέξιμο” Πιστοποίησης του Ομοιώματος.....	21
2.1.8 Σύγκριση Υπολογιζόμενων Τιμών με Μετρούμενες.....	21
2.1.9 Ευαισθησία του Ομοιώματος.....	22
2.1.10 Σταθερότητα του Ομοιώματος.....	22
2.1.11 Ταχύτητα Σύγκλισης του Ομοιώματος.....	22
2.1.12 Δημιουργία Μελλοντικών Προβλέψεων.....	22
2.2 Αγρομετεωρολογικά Μοντέλα.....	22
2.2.1 Τεχνικές Παλινδρόμησης και Συσχέτισης.....	23
2.3 Μοντέλα Προσομοίωσης.....	23
2.4 Υδρολογικά Μοντέλα.....	25
2.5 Μοντελοποίηση και Παραμετροποίηση.....	27
2.6 Μετεωρολογικά Δεδομένα.....	30
2.7 Απαιτήσεις Ακρίβειας στα Μοντέλα και Μοντέλα Ανάπτυξης Παραγωγής.....	31
2.8 Βαθμονόμηση και Πιστοποίηση Μοντέλων.....	33
2.9 Βιβλιογραφία Κεφαλαίου 2.....	36
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 – ΜΕΘΟΔΟΙ ΠΡΩΤΗΣ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗΣ.....</b>	<b>37</b>
3.1 Βασικές Αρχές.....	37
3.2 Μέθοδοι Πρώτης Προσέγγισης.....	38
3.2.1 Φαινολογική Προσέγγιση.....	39
3.2.2 Μετεωρολογική Προσέγγιση.....	42
3.2.3 Φαινομετεωρολογική Προσέγγιση.....	51
3.3 Εμπειρική Στατιστική Προσέγγιση.....	70

3.4	Βιβλιογραφία Κεφαλαίου 3.....	72
-----	-------------------------------	----

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 – ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΚΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΙΚΗ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ.....74

4.1	Δεδομένα για την Πρόβλεψη Παραγωγής.....	74
4.1.1	Περιβαλλοντικά Δεδομένα.....	74
4.1.2	Δεδομένα Καλλιέργειας.....	74
4.1.2.1	Ταξινόμηση και Παρουσίαση Δεδομένων.....	74
4.1.2.2	Απόδοση.....	75
4.1.2.3	Ποιότητα.....	75
4.1.2.4	Φαινολογικά Χαρακτηριστικά.....	76
4.2	Μέθοδοι Συστηματοποίησης.....	79
4.3	Ανάλυση.....	83
4.4	Σύνθεση.....	90
4.5	Τυποποίηση Διαδικασιών.....	112
4.6	Βιβλιογραφία Κεφαλαίου 4.....	115

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5-ΑΙΤΙΟΚΡΑΤΙΚΑ Η ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΤΙΚΑ ΜΟΝΤΕΛΑ.....119

5.1	Αιτιοκρατικά ή Προσδιοριστικά Μοντέλα.....	119
5.1.1	Στατιστικά Μοντέλα.....	119
5.1.2	Μηχανιστικά Μοντέλα.....	119
5.1.3	Συναρτησιακά Μοντέλα.....	120
5.2	Στατιστικά και Μηχανιστικά Μοντέλα.....	120
5.2.1	Μοντέλα σταθερού ρυθμού ανάπτυξης.....	125
5.2.2	Μοντέλα δείκτη υπόλοιπου θερμοκρασιών (TRIM).....	126
5.2.3	Καμπυλόγραμμα μοντέλα θερμοκρασίας .....	135
5.2.4	Μοντέλα θερμοκρασίας μήκους ημέρας .....	137
5.2.5	Ελάχιστη φωτοπερίοδος στα μοντέλα .....	137
5.2.6	Τρι-τετραγωνικό μοντέλο .....	139
5.2.7	Μοντέλα εαρινοποίησης.....	144
5.2.8	Μοντέλα δείκτη διαφοράς θερμοκρασιών.....	145
5.2.9	Συντελεστής μεθόδου ποικιλότητας.....	149
5.2.10	Μέθοδος παλινδρόμησης.....	149
5.2.11	Καμπυλόγραμμα μοντέλα.....	153
5.2.12	Φωτοθερμικά μοντέλα.....	156
5.2.12.1	Απλά Μοντέλα.....	157
5.2.12.2	Σύνθετα Μοντέλα.....	159
5.3	Διάφορα Μοντέλα ( Miscellaneous models ).....	161
5.3.1	Μοντέλα που Περιλαμβάνουν Διάρκεια Έντονης Ηλιοφάνειας.....	161
5.3.2	Μοντέλα που Περιλαμβάνουν Δεδομένα Ολικής Ενέργειας.....	162
5.3.3	Μοντέλα που Περιλαμβάνουν Υπολογισμούς Ισοζυγίου Θερμότητας.....	164
5.3.4	Μοντέλα που Περιλαμβάνουν Βροχόπτωση ή Καταπόνηση Φυτού από Έλλειψη Νερού.....	166
5.4	Συναρτησιακά Μοντέλα.....	167

5.4.1	Δεδομένα Τηλεπισκόπησης.....	168
5.4.2	Παραγωγή και Απόδοση.....	172
5.4.3	Δομή των Συναρτησιακών Μοντέλων.....	173
5.4.4	Δορυφορικά Δεδομένα και Μοντέλα Πρόγνωσης Παραγωγής.....	175
5.4.4.1	Χρήση Δεικτών Βλάστησης – Στιγμιαία Εκτίμηση.....	175
5.4.4.2	Χρήση Δεικτών Βλάστησης – Χρονικές Σειρές.....	176
5.4.4.3	Δείκτης Βλάστησης Κανονικοποιημένης Διαφοράς (NDVI).....	177
5.4.5	Χρήση Δεδομένων METEOSAT, Μοντέλο Dedieu.....	182
5.4.6	Τρόποι Χρήσης Δορυφορικών Δεδομένων στα Μοντέλα.....	182
5.4.7	Παρακολούθηση Καλλιεργειών Βιομάζας.....	186
5.4.8	Υπολογισμός Βιομάζας Βαμβακιού στην Καρδίτσα.....	189
5.5	Παραδείγματα Αιτιοκρατικών Μοντέλων.....	194
5.5.1	WOFOST.....	194
5.5.1.1	Προσομοίωση της Ανάπτυξης της Καλλιέργειας.....	198
5.5.2	PLASMO.....	205
5.5.2.1	Εφαρμογή του PLASMO.....	206
5.5.2.2	Εφαρμογή του PLASMO σε Πραγματικά Δεδομένα.....	207
5.5.3	PERO.....	208
5.5.4	AFRC.....	210
5.5.5	SUCROS.....	213
5.5.6	CERES.....	215
5.5.7	Τα Μοντέλα Baier, Williams, Warrick – Gardner, Hanks – Hubbard, Duchan και το Μοντέλο Ξηρής Ύλης.....	218
5.5.8	Βιβλιογραφία Κεφαλαίου 5.....	222

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 - ΣΤΟΧΑΣΤΙΚΑ ΜΟΝΤΕΛΑ.....233

6.1	Δυναμικά Μοντέλα.....	234
6.1.1	Προσομοιώνοντας την Ανταλλαγή Ενέργειας και Μάζας για το Σύστημα Έδαφος – Φυτό – Ατμόσφαιρα.....	235
6.1.2	Ανταλλαγή Ενέργειας και Μάζας στην Φυλλική Επιφάνεια.....	238
6.1.3	Μεταφορά Θερμότητας και Νερού στο Έδαφος.....	239
6.1.4	Παραμετροποίηση Μοντέλων Ανταλλαγής Ενέργειας και Μάζας.....	240
6.1.5	Προσομοίωση Παραγωγής Φυτού.....	243
6.1.5.1	Αύξηση Αυτού.....	243
6.1.6	Εφαρμοζόμενα Δυναμικά Μοντέλα και η Χρήση τους.....	248
6.1.7	Πρόγνωση Παραγωγής Φυτών με Δυναμικά Μοντέλα.....	252
6.1.7.1	Διαχείριση της Φυτικής Παραγωγής.....	253
6.1.7.2	Υπολογισμός Εδαφικών και Κλιματικών Πηγών.....	254
6.2	Καταστατικά Μοντέλα.....	259
6.2.1	Διαδικασία και Μέτρηση Σφάλματος.....	260
6.2.2	Παλινδρομικό Μοντέλο Μεταβλητού Χρόνου.....	262
6.2.3	Μεταβλητό Μοντέλο με Μέτρηση Σφάλματος (EVM).....	263
6.2.4	Φυσικά και Εννοιολογικά Μοντέλα.....	263
6.3	Περιοδικά Επαναλαμβανόμενο Πεδίο Εκτίμησης και Kalman Filter Εξισώσεις.....	264

6.3.1	Kalman Filter Εξισώσεις.....	265
6.4	Ένα Μοντέλο για την Πρόγνωση της Πλημμύρας.....	266
6.5	Μοντέλο Μη Γραμμικής Αντίδρασης.....	266
6.6	Προσδιοριστική Εκτίμηση Χρονικού Βήματος Χρονομεταβλητών Παραμέτρων.....	268
6.7	Kalman Filter Εκτίμηση.....	271
6.8	Συμπεράσματα για την Kalman Filter Εκτίμηση.....	279
6.9	Βιβλιογραφία Κεφαλαίου 6.....	281

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7 – ΠΡΟΓΝΩΣΗ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ.....288**

7.1	Αγρομετεωρολογία και Καλλιέργειες.....	288
7.2	Μοντέλα Πρόβλεψης Εχθρών και Ασθενειών.....	291
7.2.1	CARS.....	292
7.2.2	Μοντέλο Ανάπτυξης Ζιζανίων.....	294
7.3	Ανασκόπηση Μεθόδων Πρόγνωσης Συγκομιδής.....	295
7.3.1	Ανάλυση Χρονικής Τάσης.....	295
7.3.2	Ανάλυση Παλινδρόμησης και Στατιστικά Μοντέλα.....	296
7.3.3	Συνδυασμός Χρονικής Τάσης και Ανάλυσης Παλινδρόμησης.....	296
7.3.4	Προσομοίωση Αύξησης Φυτών Χρησιμοποιώντας Απλούς Δείκτες Παραγωγής Φυτών.....	296
7.3.5	Μέθοδοι Προσομοίωσης Αύξησης Φυτών που Βασίζονται σε Προσδιοριστικά Μοντέλα.....	297
7.3.6	Συνδυασμός Προσομοίωσης Αύξησης Φυτών και Ανάλυση Χρονικής Τάσης στα Μοντέλα Παλινδρόμησης.....	297
7.3.7	Μέθοδοι υπό Ανάπτυξη – Μέθοδοι Τηλεπισκόπησης.....	298
7.3.7.1	Στατιστική Προσέγγιση.....	299
7.3.7.2	Προσδιοριστική Προσέγγιση.....	299
7.3.7.3	Συνδυασμένη Προσέγγιση – Ενσωμάτωση των Πληροφοριών Τηλεπισκόπησης σε Μοντέλα Προσομοίωσης της Αύξησης Φυτών.....	299
7.4	Το Μέλλον της Προσομοίωσης Φυτικής Παραγωγής.....	299
7.5	Πειραματική Υποστήριξη στην Προσομοίωση.....	302
7.6	Προς τα Νέας Γενιάς Μοντέλα.....	304
7.7	Βιβλιογραφία Κεφαλαίου 7.....	306

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8 – ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ-ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ.....310**

8.1	Συμπεράσματα.....	310
8.2	Προτάσεις.....	311
8.3	Βιβλιογραφία Κεφαλαίου 8.....	312

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η εφαρμογή των καιρικών προγνώσεων στην προστασία των καλλιεργειών και πολύ περισσότερο η ίδια η δυνατότητα πρόγνωσης/εκτίμησης της παραγωγής, εμπεριέχει την χρήση ποιοτικών και ποσοτικών περιγραφών και εκτιμήσεων των κριτικών επιπέδων διάφορων καιρικών παραγόντων. Οι παράγοντες αυτοί σχετίζονται με την αύξηση και ανάπτυξη των φυτών καθώς και με την εμφάνιση και ανάπτυξη εχθρών και ασθενειών. Τα επόμενα κεφάλαια της εργασίας εμπεριέχουν παραδείγματα κριτηρίων και αρχών που βρέθηκαν στα μοντέλα αύξησης και ανάπτυξης των φυτών καθώς και παραδείγματα που αφορούν την επίδραση στην παραγωγή της εμφάνισης και ανάπτυξης εχθρών και ασθενειών.

Όλα αυτά κάνουν ακόμη περισσότερο αναγκαία την κατανόηση των απαιτήσεων των αρχικών δεδομένων και πληροφοριών, που βοήθησαν τους ειδικούς στην πρόγνωση να βγάλουν ανακοινώσεις για την εκτίμηση της παραγωγής και την προστασία των καλλιεργειών.

Με τον όρο προσομοίωση εννοείται η μαθηματική απεικόνιση ενός φυσικού φαινομένου ή μιας διεργασίας. Η παρούσα εργασία έχει ως αντικείμενο την Αγρομετεωρολογική Προσομοίωση, δηλαδή την απεικόνιση του κύκλου της φωτοσύνθεσης, του κύκλου του νερού ή του κύκλου του αζώτου, με στόχο την πρόγνωση της γεωργικής παραγωγής.

Όπου τα δεδομένα στην καλλιέργεια δεν μπορούν να μετρηθούν ή δεν έχουν γίνει μελέτες για τις προηγούμενες εξάρσεις των εχθρών είναι αναγκαίο να μελετηθεί το κλίμα των καλλιεργειών από τα δεδομένα ενός μετεωρολογικού σταθμού ή ενός δορυφόρου χρησιμοποιώντας κάποιο μοντέλο. Τέτοια μοντέλα περιέχουν κάποιες ή όλες από τις παρακάτω μεταβλητές: θερμοκρασία, ταχύτητα ανέμου, υγρασία, ακτινοβολία και διάρκεια υγρής επιφάνειας. Τρεις μεγάλες κατηγορίες μοντέλων σε σειρά δυσκολίας είναι οι παρακάτω:

1. Εμπειρικά μοντέλα που χρησιμοποιούν τεχνικές παλινδρόμησης για απευθείας σύνδεση με κάποιες μετρημένες μεταβλητές, όπως είναι η θερμοκρασία της καλλιέργειας από τη θερμοκρασία του μετεωρολογικού σταθμού. Αυτές είναι γενικά για μικρές τοποθεσίες και δεν μπορούν να εφαρμοστούν για καινούριες περιοχές. Οι σχέσεις επίσης αυτές αλλάζουν ανάλογα με το στάδιο ανάπτυξης της καλλιέργειας.

2. Ένα μείγμα βασικών θεωριών σε συνδυασμό με την εμπειρία που συνδέει μια παραγόμενη μεταβλητή όπως είναι η διάρκεια της δρόσου με πολλές μεταβλητές που θα μετρούνται από το σταθμό. Τέτοια μοντέλα είναι συνήθως τόσο απλά που θα μπορούσαν να δουλεύουν με μόνο ένα προγραμματισμένο υπολογιστή.

3. Τα μοντέλα που αναπτύσσονται πλήρως στην καλλιέργεια, τα οποία έχουν τη δυνατότητα να μιμούνται όλες τις μεταβλητές σε ολόκληρη την καλλιέργεια και τα οποία μπορεί να περιέχουν και το έδαφος. Τέτοιες μεταχειρίσεις γίνονται ολοένα πιο πολύπλοκες και απαιτούν την ικανότητα πλήρους υπολογισμού, ειδικά όταν το μικροκλίμα επηρεάζεται από την επιφάνεια του εδάφους και τα κοντινά σε αυτήν στρώματα.

Η πολυπλοκότητα και η αβεβαιότητα ορισμένων μερών της θεωρίας που σχετίζεται με τα πλήρως ανεπτυγμένα μοντέλα, τα κάνει προς το παρόν να μελετούνται μόνο ως πιθανές λύσεις. Τα σχήματα αντιμετώπισης των



εχθρών μπορούν να βασίζονται σε εμπειρικές ή ημιεμπειρικές σχέσεις από σχετικά μικρές περιόδους παρατηρήσεων ταυτόχρονα στην καλλιέργεια και στους σταθμούς. Παρόλα αυτά η μελέτη στην καλλιέργεια είναι ακόμα μια πολύ αξιόπιστη τεχνική, όπου αυτό είναι δυνατό.

Ο έλεγχος των μετεωρολογικών μεταβλητών που απαιτούνται για την αντιμετώπιση των εχθρών, απαιτούν ένα συνδυασμό των μετρήσεων τόσο στην καλλιέργεια, στους μετεωρολογικούς σταθμούς, όσο και στα δεδομένα των δορυφόρων.

Οι παράγοντες που σχετίζονται με τον καιρό και που επηρεάζουν περισσότερο την αύξηση και ανάπτυξη των φυτών καθώς και τις ασθένειες και τους εχθρούς και που χρησιμοποιούνται για την πληροφόρηση και την προειδοποίηση των συστημάτων, είναι η θερμοκρασία (συνήθως μέγιστη και ελάχιστη), η σχετική υγρασία, η βροχόπτωση (η ποσότητα και η διάρκεια), η διάρκεια υγρής επιφάνειας (συχνά σχετίζονται εμπειρικά με τη βροχή και τη δρόσο), η εδαφική υγρασία, η ταχύτητα και η κατεύθυνση του ανέμου και η ηλιοφάνεια (ή η νεφοκάλυψη).

Η αλληλεπίδραση μεταξύ των μετεωρολογικών και υδρολογικών παραγόντων από την μία και της γεωργίας με την ευρύτερη έννοια από την άλλη περιλαμβάνει τομείς όπως το έδαφος, τα φυτά, ασθένειες, εχθροί και ζιζάνια των φυτών και ζώων κ.α. Το γεγονός ότι η αγρομετεωρολογία υπεισέρχεται σε εξειδικευμένους κλάδους της γεωπονικής επιστήμης αποκτά ιδιαίτερη βαρύτητα αν αναλογιστεί κάποιος ότι η αύξηση και η ανάπτυξη ή εξέλιξη τόσο των φυτών όσο και των ζώων εξαρτώνται βασικά από τις φυσικές συνθήκες των μέσων όπου διαβιούν.

Όλοι αυτοί οι παράγοντες μπορούν να προβλεφθούν από την καθημερινότητα, αλλά η ακρίβεια αυτών ποικίλει ανάλογα με τη γεωγραφική περιοχή. Η ανάλυση χώρου – χρόνου ενός καλού συνοπτικού δικτύου είναι συχνά σημαντική για τον έλεγχο του ανέμου, της υγρασίας και της θερμοκρασίας για την αύξηση και ανάπτυξη των φυτών και την αντιμετώπιση των εχθρών. Εξαιρέσεις γίνονται για περιοχές με περίπλοκη τοπογραφία ή κοντά σε ακτογραμμές.

Τα ραντάρ οι αυτόματοι μετεωρολογικοί σταθμοί και οι δορυφόροι μπορούν να παρέχουν μερικές από τις απαιτούμενες λύσεις. Η εκτίμηση στην καλλιέργεια παρέχει τις τελικές λύσεις, αλλά χρειάζεται πολύ δουλειά για την εγκατάσταση των κατάλληλων οργάνων και δικτύων.

Η εκτίμηση του κλίματος της καλλιέργειας από τα δεδομένα των μετεωρολογικών σταθμών και των δορυφόρων είναι προς το παρόν εφικτή ως ένα βαθμό, ωστόσο όπως λέει ο McQuigg (1965): οι προγνώσεις δεν χρειάζεται να είναι τέλειες για να έχουν οικονομική αξία. Το μεγαλύτερο κέρδος αποκτάται από αυτές όταν οι μετεωρολόγοι και οι ειδικοί στην προστασία των καλλιεργειών είναι και οι δύο γνώστες των ικανοτήτων και των γνώσεων των πεδίων και των δύο ειδικοτήτων.

Η σύγχρονη τεχνολογία με μεθόδους και τεχνικές όπως η τηλεπισκόπηση, προσομοίωση, ψηφιακή ανάλυση δορυφορικών στοιχείων και γεωγραφικά συστήματα πληροφοριών, έχουν συμβάλει στην αύξηση των μετεωρολογικών εφαρμογών στην γεωργία. Η συμβολή αυτή χαρακτηρίζεται από την έμφαση στην πρόγνωση και παρακολούθηση της γεωργικής παραγωγής καθώς και φυσικών περιβαλλοντολογικών κινδύνων (ακραίων μετεωρολογικών φαινομένων).

Οι σωστές μακροπρόθεσμες κλιματικές «προβλέψεις» για περιόδους δεκαετιών ή και περισσότερο μπορούν να κάνουν δυνατές τις βέλτιστες λύσεις σε προβλήματα χρήσης της γης και των αποθεμάτων. Μεγάλη σημασία έχει η προσεκτική μελέτη των παρελθόντων κλιμάτων σε σχέση με τις πιθανότητες και ειδικά τα μέγιστα και διαρκή φαινόμενα που μπορεί να προκαλέσει η ατμόσφαιρα.

Μελετώντας στατιστικά το τι μπορεί να συμβεί και το τι έχει γίνει η ανάλυση αυτή σε σχέση με μελλοντικές προτάσεις μπορούν να βελτιωθούν και πρακτικά. Η πρόγνωση του καιρού συμβατικού τύπου μπορεί να παίξει ένα βοηθητικό ρόλο πάντα με την προϋπόθεση ότι τέτοιες προγνώσεις είναι αξιόπιστες, εύκολα διαθέσιμες και κυρίως ότι οι επιδράσεις του μελλοντικού καιρού είναι κατανοητές.

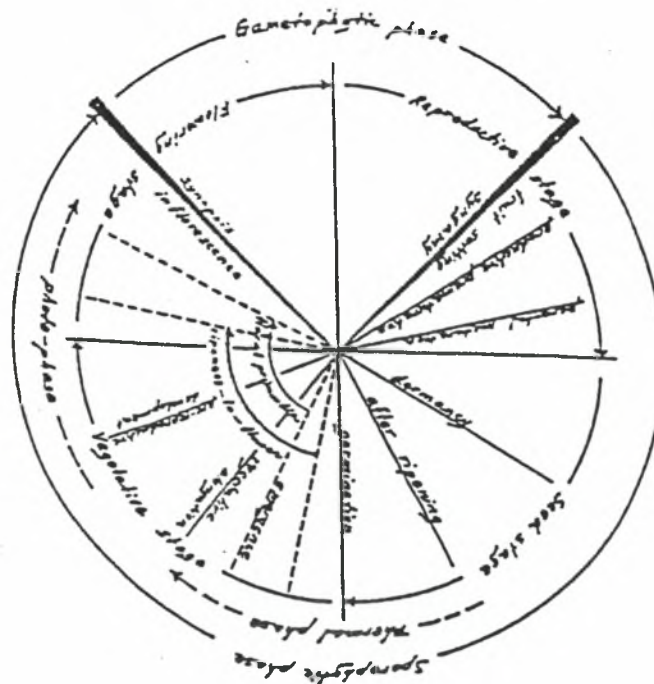
Οι καιρικές προγνώσεις σαν παράγοντας στην προστασία των καλλιεργειών καλύπτουν ένα μεγάλο εύρος σε χρονικές βαθμίδες. Σε όλες τις περιπτώσεις, ωστόσο, μπορεί να απαιτούνται σημαντικές τροποποιήσεις με σκοπό να υπολογισθούν οι τοπικές επιδράσεις (π.χ. της τοπογραφίας) όταν εφαρμόζονται σε κάποια μέρη μέσα σε μία γεωγραφική περιοχή.

Πολλές από τις εφαρμογές των καιρικών προγνώσεων στην εκτίμηση παραγωγής και στην προστασία των καλλιεργειών σχετίζονται άμεσα μεταξύ τους και μπορεί να γίνει χρήση τους με την υπάρχουσα γνώση. Ο στόχος είναι η βελτίωση ή και μεγιστοποίηση της αγροτικής παραγωγής μέσω περισσότερο ακριβούς πρόγνωσης και μέσω ελέγχου του φυσικού περιβάλλοντος με απώτερο στόχο την βελτιστοποίηση της διαχείρισης του αγροτικού περιβάλλοντος. Η πρόγνωση μπορεί να καλύπτει κάποιο εύρος από ποσοτικές προγνώσεις σοδειάς και παρακολούθηση γεωργικής παραγωγής με στόχο την αναβάθμιση της ποιότητας από την μια μεριά, μέχρι την εκτίμηση παραγωγής ζωικού κεφαλαίου καθώς και των κλιματικών καταστροφών από την άλλη.

Ωστόσο σε πολλές περιπτώσεις η πλήρης αξία των προγνώσεων δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί μέχρι οι σχέσεις μεταξύ φυτικής αύξησης και ανάπτυξης καθώς και της ανάπτυξης εχθρών και ασθενειών και καιρού γίνουν καλύτερα κατανοητές. Ακόμη και τότε το μέγιστο κέρδος δεν θα επιτευχθεί για την προστασία των καλλιεργειών έως ότου οι ειδικοί στις μετεωρολογικές προγνώσεις, οι φυτοπαθολόγοι και οι εντομολόγοι όχι μόνο θα συνεργασθούν στενά αλλά και θα βεβαιωθούν ότι το τελικό αποτέλεσμα θα έχει όλες τις απαιτήσεις που χρειάζονται για τα συστήματα παραγωγής που χρησιμοποιούνται από τους καλλιεργητές.

## 1.1. Φάσεις και Κύκλος Ζωής Φυτού

Ο Κύκλος ζωής ενός ετήσιου φυτού μπορεί να διαιρεθεί σε τέσσερα στάδια (σχήμα 1.1). Τα τέσσερα τεταρτημόρια του παρακάτω σχήματος δείχνουν απλά την αλληλουχία του κύκλου ζωής ενός ετήσιου φυτού και δεν αντιπροσωπεύουν την διάρκεια κάθε σταδίου. Χρησιμοποιούνται όροι σε διάφορα στάδια, όπως σπορά, βλαστικό, ανθοφορία και αναπαραγωγή είναι παρόμοια για όλα τα ετήσια φυτά. Βέβαια, τόσο η ταξινόμηση σε φάσεις όσο και η ανταπόκριση σε περιβαλλοντικές επιδράσεις είναι πολύ διαφορετικές από φυτό σε φυτό.



**Σχήμα 1.1** Ο κύκλος ζωής ενός ετήσιου φυτού



Επίσης υπάρχουν αντιφάσεις όσον αφορά στις ανταποκρίσεις των θερμικών φάσεων και των φαινοφάσεων, που σχετίζονται με τις διάφορες ηλικίες του φυτού. Ο Lysenko (1953) υποστήριξε ότι διαφορετικά στάδια ανάπτυξης του ίδιου φυτού απαιτούν διαφορετικές περιβαλλοντικές συνθήκες για την ολοκλήρωσή τους.

Επίσης σύμφωνα με την θεωρία του φυσιολογικού προκαθορισμού των φυτών (Klebs 1918; Kidd and West 1919; Tricker 1924) οι περιβαλλοντικές επιδράσεις στο στάδιο σποράς και στο στάδιο σποριόφυτου καθορίζουν την αύξηση και ανάπτυξη του βλαστικού και αναπαραγωγικού σταδίου. Η ταξινόμηση σε φάσεις είναι απαραίτητη για την μελέτη της ανταπόκρισης των φυτών. Για παράδειγμα, η υγρασία είναι ένας πολύ σημαντικός παράγοντας για την αύξηση καλαμποκιού κατά και ακριβώς πριν από το στάδιο της αναπαραγωγής, ενώ δεν είναι τόσο σημαντικός παράγοντας σε άλλα στάδια, αλλά όταν υπερβολική υγρασία εφαρμόζεται στα πρώιμα στάδια μπορεί να έχει αρνητικές επιπτώσεις.

Το σχήμα 1.2. χρησιμοποιείται για να δείξει την ανταπόκριση των οπωροκηπευτικών καλλιεργειών σε μετεωρολογικούς παράγοντες στις διάφορες φάσεις. Οι καλλιέργειες ταξινομούνται σύμφωνα με την οικονομική σημασία και χρήσεις βλαστήσιμων τμημάτων :

- γήινα λαχανικά (ρίζες και υπόγειοι κλώνοι),
- ανθοκομικά (λουλούδια κλπ) και
- φρούτα (φρούτα και σπόροι).

Η ανταπόκριση των καλλιεργειών σε μετεωρολογικούς παράγοντες καταγράφεται σύμφωνα με την ταξινόμηση ως σημαντικές περιόδους, σημαντικά στοιχεία και τύποι επιπτώσεων.

Η **σημαντική περίοδος** αναφέρεται σε συγκεκριμένη περίοδο του κύκλου ζωής ενός φυτού όπου οι επιπτώσεις των μετεωρολογικών παραγόντων είναι ιδιαίτερα κρίσιμες σε φαινολογικά γεγονότα όπως συγκομιδή, ποιότητα, άνθιση και αύξηση.

Τα **σημαντικά στοιχεία** αναφέρονται σε συγκεκριμένους μετεωρολογικούς παράγοντες που επικρατούν στην εξεταζόμενη περίοδο. Τα σύμβολα M, T, S, L, W, D αναφέρονται σε υγρασία (M), θερμοκρασία αέρα (τα), θερμοκρασία εδάφους (S), φως (L), άνεμος (W) και διάρκεια ημέρας (D), αντίστοιχα, ενώ οι δείκτες e και d σημαίνουν πλεόνασμα (excess) και έλλειμμα (deficiency), αντίστοιχα. Συνεπώς, ο συμβολισμός Me σημαίνει πλεόνασμα υγρασίας, ενώ ο συμβολισμός Td σημαίνει έλλειμμα θερμοκρασίας.

Οι **σημαντικές επιπτώσεις** αναφέρονται στις συνολικές επιπτώσεις των πλεονεκτικών και μη πλεονεκτικών μετεωρολογικών συνθηκών στην αύξηση και ανάπτυξη των φυτών. Τα σύμβολα Y, Q, G και F σημαίνουν συγκομιδή, ποιότητα, ανάπτυξη και άνθιση, αντίστοιχα. Δεν είναι δυνατόν να δοθούν ποσοτικές τιμές στα παραπάνω σύμβολα, ούτε τα σύμβολα καλύπτουν όλες τις περιβαλλοντικές απαιτήσεις, δεδομένου ότι αποτελούν αντικείμενο μεταβολών ανάλογα με το είδος, την ποικιλία και τις σχέσεις μεταξύ των μετεωρολογικών παραγόντων.

Συμπερασματικά, το σχήμα 1.2. δείχνει μόνο τη σχετική σημασία των μετεωρολογικών απαιτήσεων στις διάφορες φάσεις μ' ένα γενικευμένο τρόπο. Όσον αφορά στις εφαρμογές που εξετάζονται προς το τέλος του Κεφαλαίου, υπάρχουν πολλές αντιφάσεις. Είναι, συνεπώς, απαραίτητες οι εξειδικεύσεις στην ταξινόμηση των φάσεων των φυτών.

## ΦΑΣΕΙΣ ΤΩΝ ΦΥΤΩΝ

## ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΟΙ ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ

ΕΙΔΗ ΦΥΤΩΝ	ΦΑΣΗ	ΣΗΜΑΝΤΙΚΗ ΠΕΡΙΟΔΟΣ	ΤΥΠΟΣ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ	ΣΗΜΑΝΤΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ
Λαχανικά	i-Σπορά	I.....	G.....	Me,Md,Sd
	ii-Εκβλάστωση	II.....	G.....	Me,Md,Td,Ld
	iii-Έναρξη υπογείου μέρους	III.....	G,G,Q.....	Me,Md,Te,Td, Le,Ld,De,Dd, We
	iv-Άνθηση			
	v-Ωρίμανση	IV.....	Y,Q.....	Me,Md,Ld,De, Dd
Ανθοκομικά	i- Σπορά	I.....	G.....	Me,Md,Sd
	ii- Εκβλάστωση	II.....	G.....	Me,Md,Td,Ld
	iii-Ταχεία ανάπτυξη	III.....	G,G,Q.....	Me,Md,Ld,De, Dd,We
	iv- Άνθηση			
	v-Παραγωγή σπόρου	IV.....	Y,Q.....	Me,Md,Ld.De, Dd
Φρούτα	i- Σπορά	I.....	G.....	Me,Md,Sd
	ii- Εκβλάστωση			
	iii-Ανάπτυξη πλάγιων κλαδιών	II.....	G.....	Md,Ld,Td
	iv-Καρπόδεση	III.....	Q,F.....	Md,Le,Ld,De, Dd,We,Td
	v-Αρχικό στάδιο ωρίμανσης			Me,Td,Le,Ld, We
	vi-Πλήρης ωρίμανση	IV.....	Y,Q.....	

**Σχήμα 1.2** Σχηματική αναπαράσταση της διαίρεσης των φάσεων των φυτών .

**M** – υγρασία  
**T** – θερμοκρασία αέρα  
**S** – θερμοκρασία εδάφους  
**L** – φως  
**W** – άνεμος  
**D** – μήκος ημέρας

Τα **e** και **d** εκφράζουν σταθερές για έλλειψη και περίσσεια αντίστοιχα

## 1.2. Αύξηση και ανάπτυξη

Είναι απαραίτητο να γίνει διάκριση μεταξύ των όρων μεγέθυνση ή αύξηση (growth) και εξέλιξη ή ανάπτυξη (development). Η μεγέθυνση ή αύξηση αναφέρεται στην αύξηση του βάρους ή του όγκου συγκεκριμένου οργάνου ενός φυτού ή του φυτού στο σύνολο του κατά το χρονικό διάστημα μιας συγκεκριμένης φάσης ή σε όλη την βλαστική περίοδο (βιολογικό κύκλο).

Ανάπτυξη είναι η εμφάνιση μιας φάσης ή σειράς φάσεων κατά την διάρκεια της βλαστικής περιόδου. Για παράδειγμα η άνθηση ενός φυτού είναι «ανάπτυξη» ενώ η επιμήκυνση του κλώνου είναι «αύξηση». Θεωρείται ότι η αύξηση είναι μια συνεχής συνάρτηση ενώ η ανάπτυξη είναι ασυνεχής.

Σχετικά με τις μεταβολές στην χημική και φυσική σύσταση του φυτού η αύξηση παρέχει ποσοτικές μεταβολές, αλλά όχι προφανείς ποιοτικές μεταβολές. Αντίθετα η ανάπτυξη απεικονίζει την πρόοδο μιας σειράς ποιοτικών μεταβολών (με ή χωρίς εξωτερικές μεταβολές) σε όλα τα διάφορα στάδια (φάσεις) μέχρι τον θάνατο. Συνέπεια του προηγούμενου είναι ότι η αύξηση ενός φυτού μπορεί να μετρηθεί με την επιμήκυνση του βλαστού, την αύξηση του ξηρού και νωπού βάρους και άλλα συναφή μεγέθη.

Η ανάπτυξη, εξ' άλλου, παρατηρείται από την ημερομηνία φυτρώματος (ή εκβλάστησης), την ημερομηνία έναρξης της άνθισης και άλλα παρόμοια. Προκύπτει δηλαδή ότι η μελέτη της ανάπτυξης ενός φυτού είναι περισσότερο μορφολογική και φαινολογική προσέγγιση ενώ η αύξηση ακολουθεί γενικά την προσέγγιση της φυσιολογίας και της οικολογίας.

Ένας καλύτερος ορισμός της αύξησης στην αγρομετεωρολογία είναι η αύξηση του βάρους ή των διαστάσεων ενός οργάνου που είναι πολύ ευαίσθητο σε περιβαλλοντολογικές μεταβολές.

Ως παράδειγμα αναφέρεται (Wang 1958 και 1960) η μορφολογική εξέλιξη των εντός του εδάφους αυτιών του καλαμποκιού κατά το πρώιμο βλαστικό στάδιο σε σχέση με την ημερομηνία ωρίμανσης.

Στο παράδειγμα αυτό σχεδιάστηκαν πειράματα σε δέκα διαφορετικές ποικιλίες καλαμποκιού για μια περίοδο 13 ετών, βρέθηκε ότι :

- Το χρονικό διάστημα των πρώτων 12 ημερών μετά την σπορά αποτελεί την σημαντική περίοδο.

- Η θερμοκρασία εδάφους είναι ένα από τα σημαντικά στοιχεία.

- Μια οικογένεια καμπυλών της μέσης θερμοκρασίας εδάφους κατά την σημαντική περίοδο και του αριθμού ημερών ανάπτυξης για κάθε χρόνο και κάθε ποικιλία λειτουργεί ως προγνώστης.

Συμπερασματικά η μέθοδος προσπαθεί να προγνώσει την ημερομηνία ωρίμανσης του καλαμποκιού περίπου δύο μήνες νωρίτερα (ή και περισσότερο), χρησιμοποιώντας την έννοια του φυσιολογικού προϋπολογισμού με την διαδικασία ανάπτυξης.

## 1.3. Συντελεστές ανάπτυξης του φυτού.

Οι μετεωρολογικοί παράγοντες οι οποίοι είναι δυνατό να σχετίζονται με τις ασθένειες των φυτών είναι η θερμοκρασία, η υγρασία, η βροχή, το χιόνι, η ηλιοφάνεια, ο άνεμος κ.λ.π. Από αυτούς οι σπουδαιότεροι είναι η

θερμοκρασία και η υγρασία στη βάση των οποίων εξετάζεται κάθε ασθένεια των διαφόρων καλλιεργειών.

Συντελεστής αναπτύξεως καλείται οποιοσδήποτε φυσικός, χημικός ή βιολογικός συντελεστής ο οποίος επιδρά κατά οποιονδήποτε τρόπο στην ανάπτυξη του φυτικού οργανισμού.

Η επίδραση αυτή μπορεί να είναι ωφέλιμη ή όχι για την ανάπτυξη του φυτού. Για την ευδοκίμηση και την ανάπτυξη του φυτού είναι απαραίτητοι ορισμένοι συντελεστές αναπτύξεως, όπως :

- Το φως
- Ο αέρας
- Η θερμοκρασία
- Το νερό και τα θρεπτικά συστατικά

**1. Φως.** Ο ήλιος είναι η πηγή ενέργειας με την βοήθεια της οποίας πραγματοποιείται η αφομοίωση του διοξειδίου του άνθρακα. Η πράσινη ουσία του φυτού, η χλωροφύλλη, μετατρέπει με την βοήθεια της ηλιακής ακτινοβολίας την ανόργανη ύλη σε οργανική.

Η παραγωγή, μετατροπή και κατανομή των διαφόρων ορμονών είναι ευαίσθητη στην διάρκεια πολύ απαλού φωτός όσο και στη διάρκεια της σκοτεινής περιόδου. Έτσι πολλά φυτά έχουν χαρακτηριστική απόκριση στην φωτοπερίοδο.

Τα διάφορα μήκη κύματος του λευκού φωτός επιδρούν κατά διαφορετικό βαθμό στην αφομοίωση. Έχει αποδειχθεί πειραματικά ότι η εντατικότερη αφομοίωση γίνεται στο ερυθρό και κυανού φως σε αντίθεση με το υπεριώδες και το υπέρυθρο όπου γίνεται η ασθενέστερη αφομοίωση. Με έλλειψη ή ανεπάρκεια φωτός δεν σχηματίζεται χλωροφύλλη οπότε τα φυτά είναι άχροα, με μαλακό ιστό και μικρή αντίσταση. Γενικά μπορούμε να πούμε ότι η ανάπτυξη του φυτού εξαρτάται από το ποσό, την ένταση και τον χρόνο επίδρασης του φωτός.

**2. Αέρας.** Ο ξηρός αέρας περιέχει περίπου 78% άζωτο, 21% οξυγόνο και 0,03% κατ' όγκο διοξείδιο του άνθρακα CO<sub>2</sub>.

- Το διοξείδιο του άνθρακα είναι η βασική ουσία για την παραγωγή οργανικής μάζας. Η κυριότερη δε πηγή για την παραγωγή οργανικού οξέως για την αφομοίωση είναι ο ατμοσφαιρικός αέρας. Το μεγαλύτερο ποσό διοξειδίου του άνθρακα αποδίδει το έδαφος, μέσα στο οποίο αποσυντίθενται οργανικές ενώσεις. Έχει αποδειχθεί πειραματικά ότι έχουμε αύξηση της παραγωγής με την αύξηση της ποσότητας του διοξειδίου του άνθρακα.

- Το οξυγόνο είναι απαραίτητο για την αναπνοή του φυτού, όχι μόνο αυτό που βρίσκεται πάνω από την επιφάνεια αλλά και κάτω από αυτή.

- Τέλος, το άζωτο του αέρα δε χρησιμοποιείται απευθείας από το φυτό, αλλά μόνο από τις ενώσεις αυτού (αμμωνιακές, νιτρικές) οι οποίες είναι πολύτιμη τροφή για την ανάπτυξη του φυτικού οργανισμού.

**3. Θερμοκρασία ανάπτυξης του φυτού.** Όπως ο ζωικός κόσμος, έτσι και ο φυτικός έχει ανάγκη ορισμένου περιβάλλοντος μέσα στο οποίο η θερμοκρασία πρέπει να κυμαίνεται εντός ορισμένων ορίων. Για την ανάπτυξη του φυτού υπάρχει μια ελάχιστη και μια μέγιστη θερμοκρασία, μεταξύ δε αυτών των δύο οριακών τιμών βρίσκεται η βέλτιστη θερμοκρασία, στην οποία



το φυτό παρουσιάζει τη μέγιστη ένταση ανάπτυξης. Ο παρακάτω πίνακας δίνει τις τρεις προαναφερθείσες τιμές θερμοκρασίας για διάφορα φυτά.

Φυτό	Ελάχιστη θερμοκρασία	Μέγιστη θερμοκρασία	Βέλτιστη θερμοκρασία
Σιτάρι	3 – 4,5	30 – 32	25
Αραβόσιτος	8 – 10	40 – 44	32 – 35
Καπνός	13 – 14	35	28
Αγγούρι	12	40	35

Η θερμοκρασία θανάτου (ξηράνσης) του αναπτυσσόμενου φυτού κυμαίνεται συνήθως μόνο μερικούς βαθμούς πάνω από τη μέγιστη θερμοκρασίας, δύναται όμως να είναι και πολύ χαμηλότερη της ελάχιστης θερμοκρασίας αναπτύξεως.

Τέλος, η θερμοκρασία έχει μεγάλη επίδραση στην ένταση της αφομοίωσης του διοξειδίου του άνθρακα και κατά συνέπεια και του ποσού της σχηματιζόμενης οργανικής ουσίας καθώς και της ποιότητας του παραγόμενου προϊόντος.

Η ανάπτυξη των φυτών χωρίζεται ως γνωστό σε φάσεις. Κάθε φάση έχει τις απαιτήσεις της. Ο μέσος όρος των απαιτήσεων των διαφόρων φάσεων θα είναι ικανοποιητικός παράγοντας για εφαρμογή σε όλα τα στάδια ανάπτυξης.

Φυσικά, η ανάπτυξη ενός φυτού είναι συνάρτηση της θερμοκρασίας. Υπάρχουν θερμοκρασίες για καλύτερη ανάπτυξη και θερμοκρασίες μη ευνοϊκές. Γενικά παραδεχόμαστε ότι κάτω των 0° C και πάνω των 37° C καμία ανάπτυξη δε γίνεται, ενώ οι άριστες συνθήκες ανάπτυξης είναι μεταξύ 22 και 37° C.

Ως προς την αναπνοή του φυτού, αυτή υφίσταται και στους 0° C αυξανόμενη με τη θερμοκρασία, έχει το άριστό της μεταξύ 25 και 30° C, συνεχίζεται στις υψηλές θερμοκρασίες μέχρι τους 50° C, οπότε καθίσταται μηδέν και το φυτό πεθαίνει.

Παρατηρείται επομένως, ότι και οι δυο λειτουργίες εξαρτώνται από τη θερμοκρασία. Συνεπώς είναι ευνόητο ότι η ημερήσια μεταβολή της θερμοκρασίας θα έχει σημαντική επίδραση στην ανάπτυξη του φυτού και μάλιστα οι ακραίες ημερήσιες τιμές της (μέγιστα, ελάχιστα). Η εκδήλωση της καλής εκτέλεσης των λειτουργιών του φυτού είναι η αύξηση και η ανάπτυξή του, ώστε να εκτελέσει τον τελικό προορισμό του.

Η αύξηση του φυτού και οι υπόλοιπες λειτουργίες του συμπεριφέρονται αναλόγως των μετεωρολογικών παραγόντων (θερμοκρασία, φως κλπ.) και μάλιστα με τα ακραία όρια (μέγιστα – ελάχιστα) καθώς και την μεταξύ αυτών άριστη τιμή (optimum). Φυσικά, τα όρια αυτά είναι διαφορετικά για τα διάφορα φυτά εξαρτώμενα επίσης από το κλίμα του τόπου και από τα στάδια ανάπτυξης.

Οι σπουδαιότερες φάσεις ανάπτυξης είναι δύο, η φυτική φάση και η αναπαραγωγική φάση. Κατά την πρώτη φάση εξετάζεται η ανάπτυξη του φυτού ως εποχή που παρουσιάζονται τα όργανα αναπαραγωγής (άνθηση).

Χαρακτηριστικό της δεύτερης φάσης είναι η ανάπτυξη των οργάνων αναπαραγωγής (άνθη, καρπός, σπέρματα).

Όσο το φυτό σε κάθε στάδιο ανάπτυξης έχει τιμές θερμοκρασίας, υγρασίας και φωτός τέτοιες ώστε να ανταποκρίνονται στο άριστο για το κάθε στάδιο ανάπτυξης, θεωρείται ότι το φυτό βρίσκεται σε οικολογικό άριστο.

Είναι δυνατό, στους ψυχρούς τόπους, ένα φυτό να αναπτύσσεται αλλά να μη παράγει ή να ωριμάζει καρπούς και τούτο γιατί το φυτό κατά την αναπαραγωγική του φάση είναι πολύ απαιτητικό σε θερμότητα και φως.

Η καλύτερη μέθοδος για την μελέτη των υφιστάμενων σχέσεων μεταξύ ανάπτυξης του φυτού και θερμοκρασίας είναι η δια της συσσώρευσης των ημερήσιων μέσων θερμοκρασιών άνωθεν μιας βασικής τιμής θερμοκρασίας. Χρησιμοποιώντας π.χ. ως βασική τιμή τους  $18^{\circ}\text{C}$  για την ανάπτυξη ορισμένου τύπου βλάστησης, προστίθενται οι βαθμοί κατά τους οποίους η μέση ημερήσια θερμοκρασία ήταν ανώτερη των  $18^{\circ}\text{C}$ . Φυσικά, η βασική θερμοκρασία είναι διαφορετική για κάθε είδος φυτού. Έστω π.χ. ότι η ημερήσια μέση θερμοκρασία είναι  $21^{\circ}\text{C}$ . Αυτή δίνει  $21-18=3$  ημερήσιους βαθμούς αναπτύξεως (growing degree days) με βάση τη θερμοκρασία των  $18^{\circ}\text{C}$ .

Για αρνητικές διαφορές, δηλαδή για ημερήσιες μέσες θερμοκρασίες μικρότερες των  $18^{\circ}\text{C}$  λαμβάνονται 0 ημερήσιοι βαθμοί αναπτύξεως. Δηλαδή από τον τύπο με βάση την θερμοκρασία των  $18^{\circ}\text{C}$ ,

$$\text{Degree days} = [(T_{\max} + T_{\min})/2] - 18^{\circ}\text{C} \quad (1-1)$$

λαμβάνονται μόνο οι θετικές διαφορές. Η μέθοδος αυτή υποθέτει ότι μια μέση ημερήσια θερμοκρασία, π.χ. των  $24^{\circ}\text{C}$  ή  $24-18=6$  ημερησίων βαθμών αναπτύξεως, θα έχει την ίδια επίδραση στην ανάπτυξη του φυτού με εκείνη την οποία θα έχει η ημερήσια μέση θερμοκρασία των  $21^{\circ}\text{C}$  λαμβανομένη δύο φορές ή αυτή που θα έχει η των  $20^{\circ}\text{C}$  λαμβανόμενη 3 φορές κ.ο.κ.

Εδώ το σημαντικό σφάλμα ευρίσκεται στην υπόθεση ότι η συσχέτιση της ανάπτυξης και της θερμοκρασίας θεωρείται γραμμική για τιμές θερμοκρασίας μεγαλύτερες της βασικής. Το παραπάνω σφάλμα θεωρείται μικρό, μόνο όταν το φυτό βρίσκεται στο οικολογικό του άριστο.

Στο σχήμα 1.3. δίνεται η καμπύλη του ρυθμού αναπτύξεως συναρτήσει της θερμοκρασίας.

Το σημείο Α δίνει την αρχή της σημαντικής αναπτύξεως και το Β το άριστο. Φυσικά, η καμπύλη αναπτύξεως είναι συνάρτηση πολλών παραγόντων όπως, π.χ. ποικιλιών, κλίματος κλπ. Κάθε ποικιλία έχει ανάγκη ορισμένου αριθμού ημερών βαθμών αναπτύξεως έως τη συγκομιδή της π.χ. έστω ότι οι βαθμοί αναπτύξεως για τον αραβόσιτο είναι 2.500. Αθροίζοντας τις Degree days εξάγεται προσεγγιστικά ο κατάλληλος χρόνος για συγκομιδή.

Ο δεύτερος τρόπος υπολογισμού της υφιστάμενης σχέσης μεταξύ αναπτύξεως του φυτού και θερμοκρασίας είναι η μονάδες αποτελεσματικής θερμότητας E.H.U. (effective heat unit). Αυτός διορθώνει τα περισσότερα από τα υπάρχοντα σφάλματα στα διάφορα τμήματα της καμπύλης αναπτύξεως.

Ο χρησιμοποιούμενος τύπος είναι :

$$\text{E.H.U.} = (T_{\max} + T_1 + \Delta T_1)/2 - T_2 - \Delta T_2 \quad (1-2)$$

$T_1$  = θερμοκρασία κάτω του ορίου σημαντικής ευνοϊκής ανάπτυξης ( $10^{\circ}\text{C}$ ),

$\Delta T_1 = T_{\min} - T_1$  μόνο θετικές τιμές,

$T_2$  = η θερμοκρασία με τα άριστα αποτελέσματα ( $30^{\circ}\text{C}$ ), δηλαδή μέγιστης ανάπτυξης

$\Delta T_2 = T_{\max} - T_2$  μόνο θετικές τιμές.

Ο τύπος αυτός βασίζεται στην υπόθεση ότι Δε λαμβάνει χώρα αισθητή ανάπτυξη του υπό μελέτη φυτού σε θερμοκρασίες κάτω της βασικής των  $10^{\circ}\text{C}$ .

Ένας τρίτος τρόπος μελέτης σχέσεων ανάπτυξης και θερμοκρασίας είναι ο δια των αποτελεσμάτων της ακτινοβολίας.

Τέλος, υπάρχει και ο φωτοθερμικός τρόπος, ο οποίος είναι συνδυασμός των επιδράσεων φωτός και θερμοκρασίας.

**4. Το νερό.** Το νερό έχει ιδιαίτερη σημασία για τη διατροφή και τη ζωή του φυτού. Το πρωτόπλασμα των κυττάρων μόνο πάνω από ορισμένο βαθμό διογκώσεως είναι ικανό να διεξάγει τις διάφορες φυσιολογικές λειτουργίες. Για την πλήρη φυσιολογική δράση του φυτικού οργανισμού είναι απαραίτητη η ύπαρξη ορισμένης ισορροπίας μεταξύ της πυκνότητας του κυτταρικού χυμού, του ύδατος του πρωτοπλάσματος και του βαθμού διογκώσεως του κυττάρου.

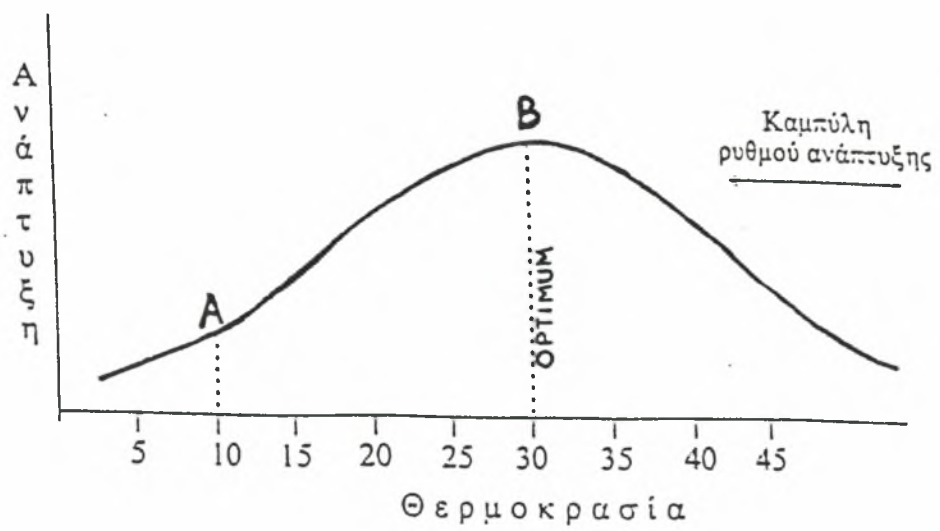
Εάν ελαττώνεται το ποσό του ύδατος εντός του φυτού και κατά συνέπεια ο βαθμός διογκώσεως του πρωτοπλάσματος κάτω από ένα ορισμένο όριο, τότε παρατηρούμε περιορισμό των φυσιολογικών αντιδράσεων και έναρξη της μαράνσεως του φυτού.

Η παραγωγή των ορμονών μέσα στο φυτό ελέγχεται επίσης σε μικρότερο βαθμό από την θρέψη του φυτού και έτσι μπορεί να ελέγχεται επίσης τόσο από την έλλειψη νερού όσο και την διαθεσιμότητα των θρεπτικών του εδάφους.

Γενικά, η φυσιολογική σημασία του νερού είναι πολλαπλή. Είναι ένα από τα βασικά στοιχεία για το σχηματισμό οργανικής ουσίας κατά την αφομοίωση, είναι το μεταφορικό μέσο των προϊόντων της αφομοίωσης στα διάφορα μέρη του φυτού. Μέσα από το νερό μεταφέρονται τα θρεπτικά συστατικά του εδάφους στο φυτικό οργανισμό και είναι το διαλυτικό μέσο με τη βοήθεια του οποίου γίνονται όλες οι φυσιολογικές αντιδράσεις.

Κατά τη διαδικασία της προσλήψεως του νερού από το έδαφος διεξάγεται ένας αγώνας μεταξύ του εδάφους και των ριζών του φυτού. Το μεν έδαφος προσπαθεί να συγκρατήσει το νερό μέσα του, το δε φυτό με τη βοήθεια του ριζικού του συστήματος, τείνει να το απορροφήσει από το έδαφος.

Η μέγιστη δυνατή δύναμη, την οποία αναπτύσσει κάθε φυτό για την αφαίρεση του νερού από το έδαφος, ονομάζεται αναρροφητική δύναμη ή οσμωτική πίεση των ριζών. Η αναρροφητική δύναμη των διαφόρων φυτών είναι διαφορετική. Γενικά τα φυτά των ξηρών και αλατούχων περιοχών έχουν αναρροφητική δύναμη. Τα φυτά των ερημικών περιοχών έχουν αναρροφητική δύναμη 17 έως 100 ατμόσφαιρες, ενώ των βορείων περιοχών μόλις 9 ατμόσφαιρες.



Σχήμα 1.3 Καμπύλη ρυθμού ανάπτυξης



#### 1.4. Ποσοτική έκφραση αύξησης – ανάπτυξης στην σχέση καλλιέργεια-καιρός

Η ανάπτυξη των φυτών ελέγχεται βιολογικά από ένα αριθμό από ορμόνες οι οποίες ρυθμίζουν τις ποικίλες μορφολογικές μεταβολές οι οποίες σταδιακά λαμβάνουν χώρα μέσα στα φυτικά κύτταρα. Η παραγωγή τέτοιων ορμονών τόσο ενεργοποιητικές όσο και κατασταλτικές, είναι ένα γενετικό χαρακτηριστικό του κάθε είδους φυτού και της κάθε ποικιλίας. Η παραγωγή τους ή η καταστροφή τους επηρεάζεται σημαντικά από το εξωτερικό τους περιβάλλον όπως αναφέρθηκε στην προηγούμενη ενότητα.

Εξαιτίας των ρυθμιστικών επιδράσεων των ορμονών στην ανάπτυξη των φυτών και στην εξάρτησή τους από το εξωτερικό περιβάλλον είναι πιθανό να κατασκευάσουμε μοντέλα τα οποία θα συσχετίζουν το ρυθμό της ανάπτυξης των καλλιεργειών σε συγκεκριμένους περιβαλλοντικούς παράγοντες, κυρίως τη θερμοκρασία και τη φωτοπερίοδο.

Η ποσοτική έκφραση της αύξησης και της ανάπτυξης των κατοικίδιων ζώων και των καλλιεργούμενων φυτών καθώς και των αντιδράσεών τους στα περιβαλλοντικά φαινόμενα είναι ζωτικής σημασίας για την αγρομετεωρολογική έρευνα. Απαιτείται, όπου αυτό είναι δυνατό, συστηματική μελέτη του θέματος, με τη χρήση στατιστικών και μαθηματικών μεθόδων. Δηλαδή, οι λιγότερο ακριβείς περιγραφικές εκφράσεις πρέπει να αντικαθίστανται από αριθμούς και στατιστικά και μαθηματικά σύμβολα, έτσι ώστε να περιορίζεται στο ελάχιστο η υποκειμενικότητα. Επίσης, κατ' αυτόν τον τρόπο μπορούν να επαληθευτούν τα αποτελέσματα άλλων ερευνών, χωρίς να ανατρέχουμε σε περιττά επιχειρήματα.

Αν και κάποιες φορές είναι δύσκολο να επιτευχθεί, η στατιστική και μαθηματική ανάλυση είναι άκρως απαραίτητη για την καθαρά επιστημονική μελέτη. Ουσιαστικά, η ανάλυση αυτή και οι εκφράσεις που χρησιμοποιεί αποτελούν μία ομάδα συμβόλων που μεταφέρουν τις ιδέες του χρήστη τους με συστηματοποιημένο τρόπο. Επομένως, είναι σημαντικό να εφαρμόζεται η κατάλληλη μέθοδος για κάθε συγκεκριμένο πρόβλημα.

Όταν χρησιμοποιείται κάποια συγκεκριμένη διατύπωση, θα πρέπει να είναι πλήρως κατανοητές οι βασικές της υποθέσεις, τα όρια της και η εγκυρότητά της. Έτσι, όλες οι διατυπώσεις θα πρέπει να βασίζονται στην ερμηνεία των αρχών της φυσικής και των νόμων της φυσιολογίας.

Στην προσπάθεια για ακριβή επιστημονική διατύπωση πολλά μοντέλα έχουν αναπτυχθεί για τον υπολογισμό της επίδρασης του καιρού στην ανάπτυξη των φυτών και στον χρόνο ωρίμανσής τους. Τα πιο ευρέως διαδεδομένα και εφαρμόσιμα από αυτά τα μοντέλα περιλαμβάνουν την αλληλεπίδραση της θερμοκρασίας και της φωτοπερίοδου και υποθέτουν μη γραμμικές σχέσεις.

Αναφέρθηκε παραπάνω ότι διαφορετικά είδη, διαφορετικές ποικιλίες και διαφορετικές φαινολογικές περίοδοι στη διάρκεια της ανάπτυξης των καλλιεργειών ανταποκρίνονται διαφορετικά στη θερμοκρασία και τη φωτοπερίοδο.

Ένα άλλο μοντέλο με ποικιλίες σε συγκεκριμένους χαρακτηριστικούς συντελεστές μπορεί να εφαρμοστεί σε όλες τις φαινολογικές περιόδους σε όλες τις ποικιλίες σε όλα τα είδη. Η βαθμονόμηση τέτοιων μοντέλων, π.χ. ο καθορισμός για κάθε γενότυπο κάτω από ένα ευρύ φάσμα περιβαλλοντικών συνθηκών είναι απαραίτητη.

Τα μοντέλα μεγέθυνσης των καλλιεργειών έχουν ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών στις γενικές δραστηριότητες. Περιλαμβάνουν τη ζωνοποίηση των καλλιεργειών, το σχεδιασμό χρήσης γης, το χαρακτηρισμό αντιδράσεων γενότυπων στο περιβάλλον και τη χρήση τους ως βιολογικά υπομοντέλα χρονοσειρών σε συστήματα βασισμένα στον καιρό, για την καταγραφή των συνθηκών της καλλιέργειας και την πρόβλεψη της παραγωγής της καλλιέργειας και της συγκομιδής.

Όσο αφορά τις εκτιμήσεις για την παρούσα βλάστηση και τις συνθήκες που επικρατούν στη συγκομιδή, εδώ και πολλά χρόνια η βελτίωσή τους είναι γεγονός πολύ μεγάλης σημασίας. Τώρα περισσότερο παρά ποτέ η βελτίωση των προβλέψεων των ιδανικών συνθηκών παραγωγής έχει την μεγαλύτερη δυνατή σημασία της και προσδιορίζει κάποιους από τους πιο σημαντικούς στόχους της αγρομετεωρολογίας και της αγροκλιματολογίας.

Στην πραγματικότητα η ανακάλυψη εκ νέου της σπουδαιότητας του καιρού και του κλίματος στην παραγωγή των καλλιεργειών, έφερε ποικίλα ερευνητικά προγράμματα και πλήθος ορισμών για τη σχέση καλλιέργεια – καιρός σε διαφορετικά επίπεδα.

Ένα από τα κύρια πλεονεκτήματα της προσέγγισης καλλιέργεια – καιρός είναι ότι οι εκτιμήσεις της απόδοσης μπορούν να εκσυγχρονιστούν καθημερινά στη βάση των συμβατικών καιρικών παρατηρήσεων.

Με την χρήση δορυφορικών εικόνων, η καταγραφή της καλλιέργειας και οι εκτιμήσεις του χώρου καλλιέργειας μπορεί να καθιερωθούν και για την καταγραφή γενιών από τις οποίες τα κατάλληλα πεδία στοιχείων είναι δύσκολο να εξαχθούν. Οι δορυφόροι μπορούν να προσφέρουν μία σχεδόν στιγμιαία ματιά στις περιοχές μελέτης και να προσφέρουν επίσης μία ομοιογένεια πληροφοριών πολύ καθαρότερη από ότι είναι διαθέσιμες από τοπικές μετρήσεις.

Η παρακολούθηση της καλλιέργειας, οι μέθοδοι των μοντέλων και η συγχώνευσή τους με δορυφορικά δεδομένα, εξαρτάται τόσο από το αντικείμενο των επιδιώξεων και χρησιμοτήτων όσο και από το διάστημα και τα επιμέρους επίπεδα στα οποία επιθυμούμε να αποδώσουμε.

Στην παρούσα εργασία επιχειρείται μια προσπάθεια ανασκόπησης των μεθοδολογιών αγρομετεωρολογικής προσομοίωσης. Αναφέρονται ορισμένες βασικές αρχές, περιγράφονται μέθοδοι πρώτης προσέγγισης του συστήματος καιρός-καλλιέργεια και ειδικότερα περιγράφεται η μεθοδολογική συστηματική προσέγγιση του θέματος. Στην μεθοδολογική συστηματική προσέγγιση εξετάζονται δύο κύριες ομάδες μοντέλων, τα ονομαζόμενα στοχαστικά και τα αιτιοκρατικά ή προσδιοριστικά μοντέλα.

## 1.5 Βιβλιογραφία Κεφαλαίου 1

1. Dalezios N. R. 1996: An overview of resents developments and applications in crop monitoring and yield assessment. International Symposium on Applied Agrometeorology and Agroclimatology. Volos 1996.
2. Δαλέζιος Ν. Ρ. 2000: Σημειώσεις Αγρομετεωρολογίας, πανεπιστημιακές παραδόσεις. Βόλος 2000.
3. Kidd, F., and C. West. 1939 : Physiological predetermination: The influence of the physiological condition of the seed upon the course of

- subsequent growth and upon the yield. III. Review of literature, Chapter II. Ann. Appl. Biol. 5 (3) 157-170; 5 (4) : 220-251:
4. Kidd, F., and C. West. 1939: Physiological predetermination: The influence of the physiological condition of the seed upon the course of subsequent growth and upon the yield. IV. Review of literature, Chapter III. Ann. Appl. Biol. 6 ( 1) : 1-26.
  5. Klebs, G. 1918: Über die Blütenbildung von Sempervivum (On the floral initiation of Sempervivum. Flora 111 ( 12) : 128-151.
  6. Lysenko, T. D. 1935: Theoretical basis of vernalization. Moscow.
  7. McCree KJ, 1971: An equation for the rate of respiration of white clover plants grown under controlled conditions. In: Setlic I (ed) Production and measurment of photosynthetic productivity. PUDOC, Wageningen, pp 221-229.
  8. Robertson G. W. :Weather - based mathematical models for estimating development and ripening of crops. W.M.O.- Technical Note No 180, 620 pp.
  9. Tincker, M. A. H. 1925: Physiological pre-determination experiments with certain economic crops: The relation between rate of germination and subsequent growth. Ann. Appl. Biol. 12:440-471.
  10. Wang J. Y. 1958: An evaluation of some techniques in Agrometeorology ( methods relating to problems in cultivated plants ) Ph. D. Thesis Univ. Wisconsin Madison, 172 pp.
  11. Wang J. Y. 1960: A critique of the heat unit approach to plant response studies. Ecology 41:785-790.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ - ΜΟΝΤΕΛΑ

### 2.1 Γενικές αρχές προσομοίωσης

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται οι αρχές προσομοίωσης των φυσικών φαινομένων ή διεργασιών. Τα φαινόμενα ή οι διεργασίες αυτές μπορούν να προσομοιωθούν με μοντέλα που με τη σειρά τους μπορούν να ταξινομηθούν σε:

- Αγρομετεωρολογικά Μοντέλα
- Υδρολογικά Μοντέλα

Εκτός των βασικών και γενικών αρχών προσομοίωσης παρουσιάζονται και ειδικές μέθοδοι προσομοίωσης για τις παραπάνω δυο κατηγορίες μοντέλων καθώς και ορισμένα από τα περισσότερο χρησιμοποιούμενα μοντέλα.

Το σχήμα 2.1 παρουσιάζει τα ακολουθούμενα στάδια/βήματα δημιουργίας ενός μοντέλου.

**2.1.1. Θεωρητική Τεκμηρίωση του Φυσικού Φαινομένου.** Η θεωρητική τεκμηρίωση του φυσικού φαινομένου, καθώς και το σύνολο των αναλυτικών εξισώσεων που αποτελούν το ομοίωμα με το οποίο πρόκειται να προσομοιωθεί το φυσικό αυτό φαινόμενο, αναπτύσσεται σχεδόν πάντοτε από ειδικούς επιστήμονες. Σχεδόν πάντοτε είναι επιβεβλημένη η δράση μιας διεπιστημονικής ομάδας ειδικών επιστημόνων ειδικών επιστημόνων που επεξεργάζονται, μέσα στα πλαίσια του ερευνητικού τους έργου, τη θεωρητική επίλυση του φαινομένου αυτού, δεδομένου ότι υπάρχει πάντα ανάμιξη των αντικειμένων διαφόρων επιστημών.

Η θεωρητική αυτή τεκμηρίωση πρέπει να στηρίζεται σε σαφείς και παραδεκτές μαθηματικές μεθοδολογίες και παραδοχές και να διατυπώνονται ρητά οι απαραίτητες μαθηματικές εξισώσεις καθώς και η συγκεκριμένη ακολουθία τους, από την αρχή μέχρι το τέλος.

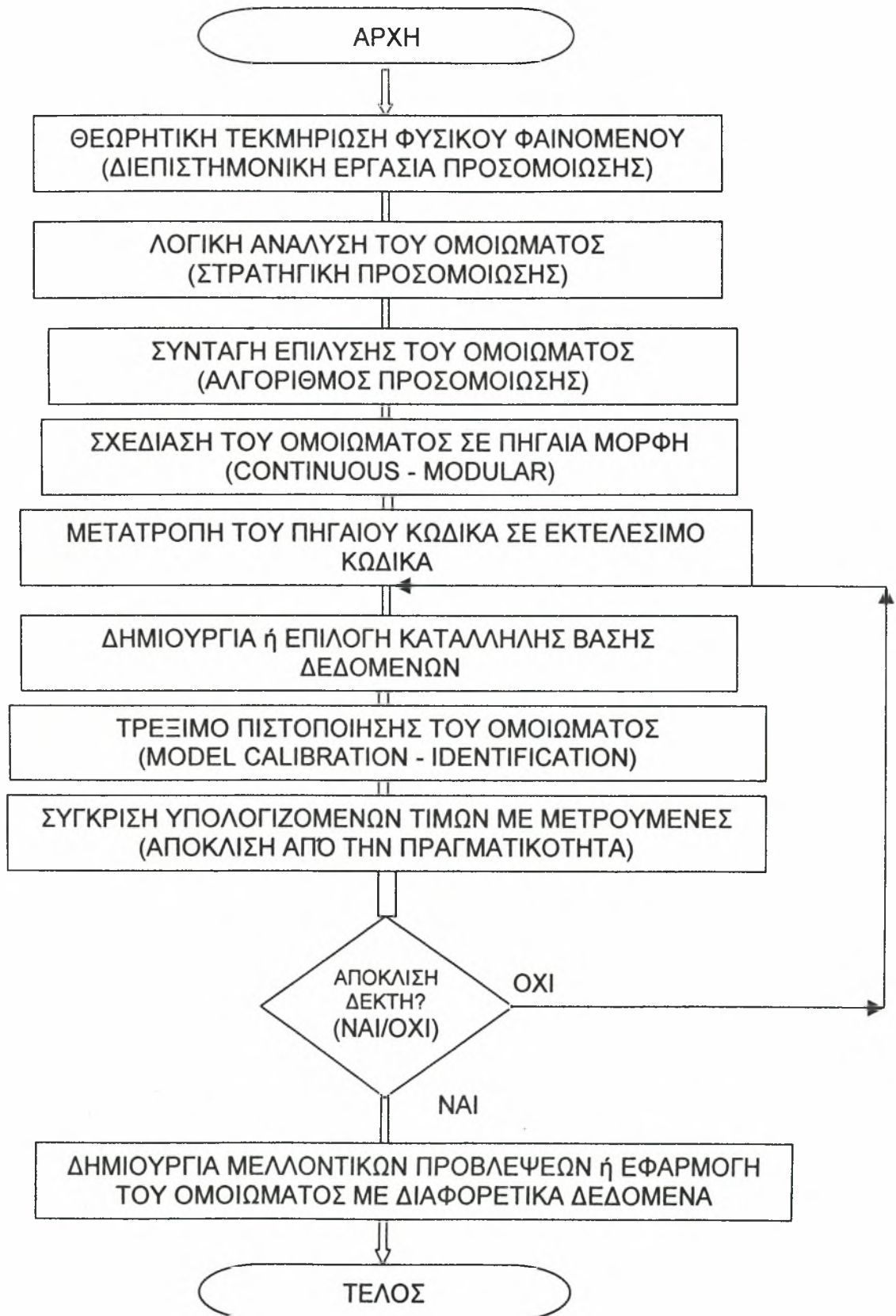
Στο σύνολο των εξισώσεων που περιγράφουν το ομοίωμα είναι δυνατόν να περιέχονται διάφορα σύμβολα που έχουν ειδική σημασία για την σωστή εκτέλεση των διαφόρων υπολογισμών των εξισώσεων στις οποίες εμπλέκονται. Πέρα δε απ'αυτό θα πρέπει να αποδεικνύεται αρκετά κοπιαστικό να επιλυθούν οι εξισώσεις αυτές με τη χρήση συμβατικών μέσων εκτέλεσης υπολογισμού (π.χ. μολυβιού και αριθμομηχανής) και να υπάρχει ανάγκη επανάληψης των υπολογισμών στο μέλλον από άλλους χρήστες ή με άλλα δεδομένα, ώστε να είναι επιβεβλημένη η χρησιμοποίηση ενός υπολογιστικού συστήματος βασισμένο στον Η/Υ.

**2.1.2. Λογική Ανάλυση του Ομοιώματος.** Κατόπιν και μετά τη κατανόηση της παραπάνω χορηγούμενης θεωρητικής τεκμηρίωσης γίνεται μια προεργασία μετατροπής της σε μορφή τέτοια που να μπορεί να μετατραπεί σε πρόγραμμα εκτελέσιμο από τον Η/Υ.

Η διαδικασία με την οποία επιτυγχάνεται αυτό καλείται λογική ανάλυση του ομοιώματος είναι μια διαδικασία μερικές φορές πολύ δύσκολη που απαιτεί γνώσεις, ευφυΐα και εμπειρία που είναι μόνον ανθρώπινα προσόντα.

Η διαδικασία αυτή, σε τελική ανάλυση, δεν μπορεί να είναι τίποτε άλλο από την στρατηγική που ενδείκνυται ή που πρέπει να ακολουθήσει κανείς για





**Σχήμα 2.1.** Βήματα για την κατασκευή ενός ομοιώματος φυσικού μοντέλου

να μπορέσει, χρησιμοποιώντας τα Δεδομένα Στοιχεία Εισόδου (Inputs) να δώσει Στοιχεία Εξόδου – Απαντήσεις –Αποτελέσματα (Outputs) στα ερωτήματα και υλική υπόσταση στα προσδοκώμενα λογικά αποτελέσματα του ομοιώματος. Η διαδικασία αυτή καταλήγει τελικά στη διατύπωση ορισμένων και σαφών βημάτων που πρέπει να γίνουν διαδοχικά ή συγχρόνως για να λυθεί το συγκεκριμένο ομοίωμα και να προσομοιωθεί έτσι το φυσικό φαινόμενο.

**2.1.3. Συνταγή Επίλυσης του Ομοιώματος.** Μετά την φάση της ανάλυσης το πρόβλημα στο σύνολο του, ή το μέρος του που θα δοθεί στον Η/Υ, πρέπει να είναι σαφές και να εξελίσσεται σύμφωνα με προκαθορισμένους νόμους, για την εκτέλεση των πράξεων και κριτήρια, για τη λήψη αποφάσεων από τον Η/Υ. Το σύνολο των οδηγιών που θα δοθούν στον Η/Υ αποτελεί μια συνταγή, έναν αλγόριθμο. Ο αλγόριθμος αυτός συνδυαζόμενος με τους ενυπάρχοντες στον υπολογιστή νόμους λειτουργίας του θα δώσει ένα αιτιοκρατικά (Deterministic) προκαθορισμένο αποτέλεσμα. Χωρίς να δοθεί ένας μαθηματικός ορισμός του αλγόριθμου θα αναφερθούν παρακάτω οι γενικές ιδιότητες που πρέπει να έχει ένας «καλός» αλγόριθμος:

- Πρέπει να έχει αρχή,
- Δεν πρέπει να έχει αμφιβολίες, δηλαδή σημεία όπου μια απόφαση πρέπει να ληφθεί χωρίς να έχουμε διασαφηνίσει το πώς θα ληφθεί,
- Πρέπει να είναι αποτελεσματικός δηλαδή να δίνει το επιδιωκόμενο αποτέλεσμα εντός πεπερασμένου χρόνου, που κοστολογείται τελικά στη διαδικασία του ελέγχου σύγκλισης του ομοιώματος,
- Πρέπει να είναι γενικός, δηλαδή να εφαρμόζεται σε όσο το δυνατόν περισσότερες παρόμοιες περιπτώσεις,
- Πρέπει να είναι αποδοτικός, δηλαδή να φθάνει στο αποτέλεσμα με τον καλύτερο και συντομότερο δυνατό τρόπο (Αρχή της ευθείας),
- Να μπορεί να εκτελεσθεί εάν είναι δυνατόν σε περισσότερες από ένα Η/Υ (Αρχή της συμβατότητας, compatibility),
- Πρέπει να έχει τέλος.

Για την περιγραφή του αλγόριθμου αυτού κατά τρόπο βολικό και παραστατικό για την ανθρώπινη λογική χρησιμοποιείται το λογικό διάγραμμα (Flow Chart) το οποίο αποτελεί μια εικόνα του τι θα γίνει μέσα στον υπολογιστή και βοηθάει πολύ στο γράψιμο του προγράμματος.

Ένα λογικό διάγραμμα αποτελείται από διάφορα απλά επίπεδα σχήματα συνδεδεμένα με γραμμές. Άλλα είναι τελείως γενικά και άλλα παριστάνονται με ορισμένα κομμάτια του Η/Υ. Τα συνηθέστερα σχήματα φαίνονται στον πίνακα 2.1.

Το λογικό διάγραμμα είναι ένας θαυμάσιος τρόπος απεικόνισης και παρουσίασης της ροής των πράξεων που χρησιμοποιούνται για την επίλυση προβλημάτων και ομοιωμάτων φυσικών φαινομένων, ιδιαίτερα όταν τα διάφορα τμήματα του ομοιώματος (μοντέλου) αναπτύσσονται από διαφορετικούς προγραμματιστές.

**2.1.4. Σχεδίαση του Ομοιώματος σε Πηγαία Μορφή.** Το επόμενο βήμα στην δημιουργία του ομοιώματος είναι η επιλογή της γλώσσας προγραμματισμού και το γράψιμο του κώδικα. Στο σημείο αυτό πρέπει να ακολουθηθούν οι παρακάτω αρχές:

- Ο προγραμματιστής πρέπει να είναι επίμονος και κάθε στιγμή να είναι συγκεντρωμένος στο έργο του,
- Μέσα στο πρόγραμμα πρέπει να γίνεται απ'άκρο σε άκρο του ευρείας χρήση της έννοιας δομής.

**Πίνακας 2.1.** Σχήματα και οι λειτουργίες που υποδηλώνουν στα λογικά διαγράμματα

ΣΧΗΜΑ	ΔΗΛΩΣΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ
Ορθογώνιο Παραλληλόγραμμο Ρόμβος Ισοσκελές Τραπέζιο Έλλειψη σε σχήμα Οβάλ Μικρός κύκλος  Μακρόστενο Εξάπλευρο Βέλος	Υπολογισμοί και πράξεις Αποφάσεις Αρχική ή τελική πράξη Αρχή ή τέλος διαγράμματος Ένωση δύο χωριστών μερών του λογικού διαγράμματος Υπορουτίνα Ροή εκτέλεσης πράξεων

Η δομή ενός προγράμματος αναφέρεται στον τρόπο με τον οποίο τα διάφορα τμήματα του συνδέονται μεταξύ τους τόσο κατά τη διαμόρφωση του τελικού αποτελέσματος όσο και κατά την διάρκεια εκτέλεσης του. Από την άποψη αυτή διακρίνονται τα παρακάτω είδη δομής:

- α. Μαζική δομή ή Καμιά δομή (Massive or Cumulative Structure)
- β. Κεντρική δομή ή Ανοικτή δομή (Central or Open Structure)
- γ. Κυτταρική δομή (Cellular Structure)

Η πράξη έχει δείξει ότι η δομή εκείνη που παρουσιάζει τα περισσότερα μειονεκτήματα είναι η μαζική δομή, κυρίως κατά τη διόρθωση λαθών, ενώ εκείνη που παρουσιάζει τα περισσότερα πλεονεκτήματα είναι η κεντρική δομή που εξασφαλίζει τεμαχισμό του κώδικα και κατά συνέπεια εύκολη πρόσβαση στα διάφορα τμήματα του σε οποιαδήποτε φάση του προγραμματισμού.

Η κυτταρική δομή είναι εκείνη που πρέπει να χρησιμοποιείται όταν τα αποτελέσματα ενός τμήματος του προγράμματος εισάγονται σαν δεδομένα στο επόμενο τμήμα του προγράμματος.

- Το πρόγραμμα πρέπει να δομείται από τα γενικά προς τα ειδικά όπως ακριβώς δομείται ένα κτίριο (Θεμέλια, κολώνες, υδραυλικά, ηλεκτρικά, κλπ.)

- Το πρόγραμμα να διαιρείται σε επιμέρους κομμάτια,

- Χρήση της φιλοσοφίας Top-Down. Αυτό σημαίνει ότι κατά τον προγραμματισμό ενός τμήματος δεν πρέπει να απασχολεί το ενδιαμέσο αποτέλεσμα μιας διαδικασίας. Η υιοθέτηση της θέσης αυτής επιβάλλει το γράψιμο μικρών συμπαγών κομματιών πηγαίου κώδικα (που καλούνται υπορουτίνες), και των οποίων τα χαρακτηριστικά τους είναι ότι δέχονται κάποια είσοδο και δίνουν κάποια έξοδο, μπορούν δε να χρησιμοποιηθούν σε όποιο σημείο του προγράμματος κρίνεται σκόπιμο μόνο με την επίκληση του ονόματός τους και το πέρασμα σ'αυτές των ανάλογων παραμέτρων.

- Γίνεται χρήση των εντολών και του συντακτικού της συγκεκριμένης γλώσσας προγραμματισμού με την οποία εργάζεται ο ερευνητής.

- Με το τέλος του γραψίματος ο τύπος του προγράμματος που έχει δημιουργηθεί λέγεται πηγαίος κώδικας (source code). Μετά το τέλος της γραφής του πηγαίου κώδικα ο προγραμματιστής που έχει ακολουθήσει τις παραπάνω αναφερόμενες αρχές έχει πετύχει να καταβάλει τις την λιγότερη δυνατή προσπάθεια πληκτρολόγησης. Επίσης με τον κατάλληλο τεμαχισμό του προγράμματος έχει ευκολία να εντοπίσει κάποιο τμήμα και να το αλλάξει προσθέτοντας ή αφαιρώντας αποφεύγοντας πάντως χάσιμο χρόνου σε άσκοπες αναζητήσεις.

**2.1.5 Μετατροπή του Πηγαίου σε Εκτελέσιμο Κώδικα.** Η μετατροπή του πηγαίου κώδικα σε εκτελέσιμο κώδικα γίνεται σε δύο στάδια. Στο πρώτο στάδιο γίνεται μετάφραση του κώδικα από την γλώσσα προγραμματισμού στη γλώσσα μηχανής με τον μεταγλωττιστή (Compiler) που είναι γνωστός σαν αντικειμενικός κώδικας.

Το δεύτερο στάδιο είναι η σύνδεση των λειτουργικών μονάδων του αντικειμενικού κώδικα. Το συνδετικό πρόγραμμα ή συνδετικός διορθωτής εκτελεί δύο κύριες λειτουργίες: συνδέει διαφορετικές λειτουργικές μονάδες του αντικειμενικού κώδικα, κάνοντας τις απαραίτητες λειτουργικές συνενώσεις μεταξύ τους και μετατρέπει τις λειτουργικές μονάδες από την μορφή του αντικειμενικού κώδικα σε ένα πρόγραμμα που μπορεί να φορτωθεί σε μορφή εκτελέσιμου αρχείου (Stand alone executable).

Όταν τα προγράμματα αναπτύσσονται σε κυτταρική ή μικτή δομή μέρη του κώδικα (π.χ. οι υπορουτίνες) μπορούν να τοποθετηθούν σε ιδιαίτερα



αυτόνομα αρχεία που καλούνται βιβλιοθήκες (Libraries). Η οργάνωση των βιβλιοθηκών και η προσθήκη ή αφαίρεση τμημάτων του αντικειμενικού κώδικα επιτυγχάνεται με τον διαχειριστή βιβλιοθηκών.

**2.1.6. Δημιουργία ή Επιλογή Κατάλληλης Βάσης Δεδομένων.** Για την εκτέλεση του προγράμματος απαιτείται η εισαγωγή δεδομένων καθώς και η εξαγωγή των αποτελεσμάτων. Η εισαγωγή των δεδομένων (Inputs) μπορεί να γίνει είτε από το πληκτρολόγιο, είτε από αρχεία, είτε τέλος από υπάρχουσες βάσεις δεδομένων. Για να μπορούν να διαβαστούν τα δεδομένα πρέπει να είναι γνωστή η εσωτερική δομή του αρχείου.

Τα στοιχεία εξόδου μπορούν να εκτυπωθούν απευθείας κατά την εκτέλεση του προγράμματος (δεν συνιστάται) ή να εισαχθούν σε ένα αρχείο ή σε μια βάση δεδομένων με ορισμένη δομή για περαιτέρω επεξεργασία.

Οι μορφές των αρχείων είναι δύο:

1. Τα σειριακά αρχεία, και
2. Τα αρχεία τυχαιάς προσπέλασης

Στην πρώτη μορφή αρχείων, τα δεδομένα εγγράφονται με κάποια δεδομένη σειρά και χωρίζονται το ένα από το άλλο με κάποιο χαρακτήρα (κόμμα ή κενό) κάποια εγγραφή χωρίζεται από την επόμενη της από ένα χαρακτήρα τέλους γραμμής και δεν είναι απαραίτητα σταθερού μήκους. Η ανάγνωση των εγγραφών, αλλά και η εγγραφή τους, στα αρχεία αυτά γίνεται με τη σειρά πράγμα που δεν ευνοεί καθόλου την ανάγνωση συγκεκριμένων δεδομένων.

Στα αρχεία τυχαιάς προσπέλασης, τα δεδομένα εγγράφονται με τη λογική των πεδίων των εγγραφών που η κάθε μία είναι συγκεκριμένου σταθερού μήκους σε bytes. Οι εγγραφές τοποθετούνται σειριακά και η κάθε εγγραφή δεν χωρίζεται από την επόμενη της από κάποιο χαρακτήρα. Η ανάγνωση των εγγραφών, αλλά και η εγγραφή τους, στα αρχεία αυτά γίνεται με την τοποθέτηση του Ενδείκτη Εγγραφών του Αρχείου (File Pointer) σε κάποιο συγκεκριμένο σημείο στο αρχείο, που αντιστοιχεί στην αρχή της επιθυμητής εγγραφής, χωρίς να είναι απαραίτητο να περάσουν από τις προηγούμενες εγγραφές.

**2.1.7. «Τρέξιμο» Πιστοποίησης του Ομοιώματος.** Μετά την τακτοποίηση όλων των ανωτέρω γίνεται το πρώτο "τρέξιμο" του προγράμματος του ομοιώματος. Ο κύριος στόχος είναι να διορθωθούν τυχών λάθη εκτέλεσης (Run Time Errors) και να ληφθούν υπ' όψη οι διάφορες προειδοποιήσεις του συστήματος που αφορούν τις δηλώσεις μεταβλητών αλλά και των διαφόρων υπορουτίνων. Τα λάθη αυτά δεν είναι ούτε λάθη σύνταξης ούτε χρήσης δεσμευμένων λέξεων αλλά λάθη λογικής και διατύπωσης δεδομένων. Τα λάθη αυτά διορθώνονται και το ομοίωμα «τρέχεται» από την αρχή.

**2.1.8. Σύγκριση Υπολογιζόμενων Τιμών με Μετρούμενες.** Μετά το "τρέξιμο" του ομοιώματος τα εξαγόμενα του που προκύπτουν από την χρησιμοποιούμενη σειρά δεδομένων συγκρίνονται με τη σειρά μετρήσεων που κρατήθηκε γι' αυτό το σκοπό. Η σύγκριση μπορεί να γίνει με την χρήση πινάκων αντιπαραθέσεως διπλής εισόδου, ή διαγραμμάτων ή με την εύρεση της κατανομής των διαφόρων υπολογιζόμενων και μετρούμενων τιμών και την εύρεση της κατανομής των διαφόρων σφαλμάτων, ή τέλος με την στατιστική επεξεργασία και σύγκριση των αποτελεσμάτων με τις παρατηρήσεις.

Για την εύρεση των κατανομών, όπου αυτό είναι απαραίτητο, ή την στατιστική επεξεργασία, χρησιμοποιείται ένα πακέτο στατιστικής, μάλλον, παρά να αφιερωθεί γι' αυτή την δουλειά χρόνος προγραμματισμού στο ομοίωμα.

Όποιος όμως και να είναι ο τρόπος ελέγχου των αποτελεσμάτων του ομοιώματος, επιπρόσθετα θα πρέπει να ελεγχθούν και τα χαρακτηριστικά του ομοιώματος που αναφέρονται παρακάτω.

**2.1.9 Η ευαισθησία του ομοιώματος (Model Sensitivity).** Αναφέρεται στο βαθμό προσομοίωσης των μετρούμενων μεγεθών του ομοιώματος όταν αλλάζουμε κάποια από τις αρχικά παραδεκτές συνθήκες ή παραμέτρους τηρουμένων των άλλων σταθερών. Η ανάλυση της ευαισθησίας του ομοιώματος ως προς το σύνολο των παραμέτρων είναι το ολοκλήρωμα της ευαισθησίας ως προς την κάθε μία ξεχωριστά. Για την κατανομή της ευαισθησίας του ομοιώματος ο ερευνητής καταφεύγει, συνήθως, σε κάποιο στατιστικό πακέτο. Πάντως μετά την ανάλυση ευαισθησίας πρέπει να εφοδιασθεί το ομοίωμα με τα λεγόμενα Όρια Ευαισθησίας (Sensitivity Limits) για να είναι δυνατή η χρήση του από άλλους χρήστες σε άλλες περιοχές.

**2.1.10. Η σταθερότητα του ομοιώματος (Model Stability).** Αναφέρεται στο εύρος των δυνατών χρησιμοποιούμενων πακέτων δεδομένων και αρχικών και οριακών συνθηκών τα οποία το ομοίωμα μπορεί να χρησιμοποιήσει, μέσα στα όρια της ευαισθησίας του, για την προσομοίωση του φυσικού φαινομένου. Είναι ένα χαρακτηριστικό του ομοιώματος αντιστρόφως ανάλογο της ευαισθησίας του. Τα Όρια Σταθερότητας του Ομοιώματος (Stability Limits) γίνονται σαφή μετά από μια πληθώρα εφαρμογών του ομοιώματος με ένα μεγάλο πλήθος αρχικών και οριακών συνθηκών.

**2.1.11. Η ταχύτητα σύγκλισης του ομοιώματος (Model Convergence).** Σε όλα τα ομοιώματα που χρησιμοποιούν κάποιους εμπειρικούς, κυρίως συντελεστές (Ιδιαίτερα ομοιώματα πεπερασμένων διαφορών ή πεπερασμένων στοιχείων) ένα άλλο χαρακτηριστικό τους είναι η Ταχύτητα Σύγκλισης (Convergence Speed) τους. Το ομοίωμα, στις περιπτώσεις αυτές, πρέπει να εφοδιάζεται και με ένα πίνακα ή με ένα διάγραμμα που να δείχνει το πραγματικό χρόνο χρήσης του Η/Υ (CPU Time) σε σχέση με διάφορες προκύπτει από μια σειρά δοκιμών του ομοιώματος με διάφορες τιμές του συντελεστή αυτού.

**2.1.12. Δημιουργία Μελλοντικών Προβλέψεων ή Εφαρμογή του Ομοιώματος με διαφορετικά δεδομένα.** Αφού το ομοίωμα πιστοποιηθεί με τη χρησιμοποιούμενη σειρά των δεδομένων και καταδειχθεί σαφώς η δυνατότητα του στο να προσομοιάζει το φυσικό φαινόμενο, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη δημιουργία σειράς προβλέψεων για τη συμπεριφορά του φυσικού συστήματος στο μέλλον. Η αρχή που ακολουθείται είναι η δημιουργία χρονολογικών σειρών προβλέψεων διάρκειας όχι μεγαλύτερης εκείνης της χρονικής σειράς των δεδομένων χρησιμοποιούμενων για την ταυτοποίηση του ομοιώματος.

Ακόμη, το ομοίωμα μπορεί να δοκιμαστεί με διαφορετικές σειρές δεδομένων κάποιων άλλων περιοχών όποτε επαναλαμβάνονται τα στάδια 6 έως 10.

## 2.2 Αγρομετεωρολογικά μοντέλα

Η παραγωγή αγροτικών προϊόντων έχει κάνει σημαντικά βήματα κατά τα τελευταία 100 χρόνια. Η σημαντικότερη, ωστόσο, πρόοδος συνέβη τα τελευταία 50 χρόνια κύρια λόγω της εφαρμογής της τεχνολογίας στην Γεωργία. Η τεχνολογική πρόοδος και οι εφαρμογές τους ιστορικά μπορούν να ταξινομηθούν σε μια σειρά από επικαλυπτόμενα βήματα:

1. Δοκιμαστική Εφαρμογή και Διόρθωση
2. Αναλογική μέθοδος της μεταφοράς της τεχνολογίας
3. Τεχνικές Παλινδρόμησης και Συσχέτισης
4. Προσομοίωση Καλλιέργειών και Γεωργικών Συστημάτων.

Ειδικά ομοιώματα στην εφαρμοσμένη αγρομετεωρολογία κάνουν χρήση των δύο τελευταίων τεχνικών. Η προσομοίωση, είναι η απλούστευση κάθε πολύπλοκου συστήματος σε ένα αριθμό απλών συνιστωσών και η διαπίστωση των σημαντικών δεσμών μεταξύ αυτών εκφρασμένη μαθηματικά. Σε αυτήν την συστημική προσέγγιση, το κλίμα και ο καιρός έχει την κύρια θέση όσο αφορά στη απόκτηση δεδομένων/μετρήσεων, επεξεργασίας, και ανάλυσης. Παρακάτω θα παρουσιαστούν τεχνικές της παλινδρόμησης και της συσχέτισης, της προσομοίωσης στην αγρομετεωρολογία.

**2.2.1. Τεχνικές Παλινδρόμησης και Συσχέτισης.** Απλή ή σύνθετη συσχέτιση μεταξύ πολλών πρωτογενών και υπολογισθέντων κλιματικών παραμέτρων και πολλών φάσεων της ανάπτυξης των φυτών και της γεωργικής παραγωγής. Στις τεχνικές αυτές, συνήθως η ετήσια παραγωγή μιας καλλιέργειας συσχετίζεται με μια ή περισσότερες κλιματικές παραμέτρους, και με την βοήθεια της γραμμικής ή μη-γραμμικής παλινδρόμησης βρίσκεται μια εξίσωση (γραμμική ή μη) που συνδέει την ετήσια παραγωγή με το κλίμα.

Ένα παράδειγμα, είναι η εργασία του Fisher (1924) η οποία παραμένει κλασική για την επίπτωση της κατανομής της βροχόπτωσης στην γεωργική παραγωγή. Ο Lomas (1976) ανακεφαalaίωσε τα αγρομετεωρολογικά δεδομένα που απαιτούνται για την παραγωγή σίτου βασιζόμενος σε πειράματα, προσομοιώσεις και στατιστικές αναλύσεις.

Η χρήση πιο εξειδικευμένων δεικτών του κλίματος και φαινολογικής χρονικής κλίμακας παρά ημερολογιακής χρονικής κλίμακας μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε άλλες περιπτώσεις. Αυτό συμβαίνει στις περιπτώσεις που αντί για την βροχόπτωση σε μια χρονική περίοδο, το έλλειμμα νερού συσχετίζεται με την ανάπτυξη των φυτών και της παραγωγής.

Αν και οι τεχνικές της συσχέτισης και της παλινδρόμησης παραμένουν χρήσιμες, έχουν ορισμένα μειονεκτήματα και περιορισμούς. Μερικά από τα κυριότερα μειονεκτήματα τους είναι:

- Η υπόθεση της σχέσης του αιτίου και αιτιατού που είναι το υπόβαθρο της μεθόδου,
- Η υπόθεση της γραμμικότητας της σχέσης μεταξύ κλιματικών και γεωργικών παραμέτρων (για την γραμμική παλινδρόμηση),
- Η σχέση που θα βρεθεί μπορεί να εφαρμοστεί μόνο στην περιοχή για την οποία έχει αναπτυχθεί.

## 2.3 Μοντέλα Προσομοίωσης

Ιστορικά, η προσομοίωση των βιολογικών διαδικασιών ακολούθησε τις τεχνικές παλινδρόμησης και συσχέτισης. Χρησιμοποιήθηκε σαν ένα καλύτερο εργαλείο για την κατανόηση της απόκρισης των φυτών στις περιβαλλοντικές συνθήκες. Τα μαθηματικά μοντέλα χρησιμοποιούν ως δεδομένα εισόδου κλιματικές παραμέτρους καθώς και εδαφικές συνθήκες. Το περισσότερο ευρέως χρησιμοποιούμενο μοντέλο είναι αυτό που προτάθηκε από τον Gossym-Baker (1983) για το βαμβάκι. Ένα άλλο μοντέλο φυσιολογίας είναι αυτό που προτάθηκε από τον Curry (1980) για τη σόγια.



Μια κατηγορία μοντέλων είναι τα μοντέλα CERES. Τα μοντέλα αυτά βρίσκονται μεταξύ των στατιστικών και μοντέλων φυσιολογίας και χρησιμοποιούν εμπειρικές σχέσεις μεταξύ των βιολογικών διαδικασιών και των κλιματικών συνθηκών για να προσομοιώσουν την ανάπτυξη και την παραγωγή του σίτου και άλλων δημητριακών. Τα μοντέλα αυτά προσομοιώνουν την φωτοσύνθεση, διαπνοή, φαινολογία, ανάπτυξη βλαστού, ανάπτυξη ριζών, εξατμισοδιαπνοή, καρποφορία, κλπ.

Η απόκριση αυτών των διαδικασιών στις περιβαλλοντικές παραμέτρους και οι αλληλεπιδράσεις τους, προσομοιώνονται σε ημερήσια βάση. Το κύριο πλεονέκτημα των μοντέλων αυτών είναι η δυνατότητα που έχουν να προσομοιώνουν την άμεση επίδραση του κλίματος και των πρακτικών καλλιέργειας στα φυτά.

Για παράδειγμα, στις Η.Π.Α. διάφοροι μελετητές εκτίμησαν την επίδραση της κλιματικής αλλαγής στην παραγωγή καλαμποκιού χρησιμοποιώντας ένα αγροκλιματικό δείκτη (τα αθροίσματα της αποδοτικής θερμοκρασίας) που συσχετίζει τις τάσεις της θερμοκρασίας με τα όρια καλλιέργειας των σιτηρών. Αυτά τα μοντέλα μπορούν να εφαρμοστούν για τη λήψη αποφάσεων μέσα στην καλλιεργητική περίοδο, για την εκτίμηση επικινδυνότητας για την λήψη στρατηγικών αποφάσεων, για την εκτίμηση της γεωργικής παραγωγής μεγάλων εκτάσεων, και για τον ορισμό των ερευνητικών αναγκών.

#### **Τύποι Μοντέλων Προσομοίωσης**

Υπάρχουν αρκετοί τύποι μοντέλων προσομοίωσης. Μια σύντομη περιγραφή των κυριοτέρων κατηγοριών ακολουθεί στη συνέχεια.

##### **1<sup>η</sup> Φυσικά Μοντέλα – Μαθηματικά Μοντέλα.**

**α. Φυσικά Μοντέλα:** Περιλαμβάνουν αναλογική τεχνολογία και αρχές ομοιότητας που εφαρμόζονται σε μοντέλα μικρής κλίμακας, π.χ. ένα εργαστηριακό αυλάκι είναι 1:10 φυσικό μοντέλο ενός ρέματος.

**β. Μαθηματικά Μοντέλα:** Βασίζονται σε μαθηματική ανάλυση για να παρομοιάσουν το σύστημα, π.χ. το UH.

##### **2<sup>η</sup> Συνεχή Μοντέλα – Διακριτά Μοντέλα.**

**α. Συνεχή Μοντέλα:** Οι διαδικασίες συμβαίνουν και παρατηρούνται συνεχώς, σε κάθε χρονική στιγμή.

**β. Διακριτά Μοντέλα:** Πολλά ψηφιακά μοντέλα προσομοίωσης βασίζονται στην αναγκαιότητα και τα πλεονεκτήματα του κατακερματισμού του χρόνου και του χώρου σε πεπερασμένα διαστήματα, π.χ. η μέθοδος της ένδειξης συσσώρευσης για πλημμυρισμένη ροή μέσω δεξαμενής.

##### **3<sup>η</sup> Δυναμικά Μοντέλα – Στατικά Μοντέλα.**

**α. Δυναμικά Μοντέλα:** Οι διαδικασίες περιλαμβάνουν αλλαγές και αλληλεπιδράσεις μέσα στο χρόνο και τα φυσικά φαινόμενα εξελίσσονται και εξαρτώνται από το χρόνο.

**β. Στατικά Μοντέλα:** Οι διαδικασίες που αφορούν τα φυσικά φαινόμενα είναι ανεξάρτητες από το χρόνο.

##### **4<sup>η</sup> Περιγραφικά Μοντέλα – Εννοιολογικά Μοντέλα.**

**α. Περιγραφικά Μοντέλα:** Δίνουν υπολογισμούς για φαινόμενα που έχουν παρατηρηθεί μέσω της εμπειρίας και με τη χρήση βασικών αρχών, όπως

είναι η αρχή της συνέχειας ή της ποσότητας κίνησης, κατά την εξάσκηση της υδρολογίας.

**β. Εννοιολογικά Μοντέλα:** Βασίζονται ισχυρά στη θεωρία για να ερμηνεύσουν φαινόμενα παρά στην παρομοίωση της φυσικής διαδικασίας, π.χ. βασίζονται σε πιθανότητες.

#### **5<sup>η</sup> Συγκεντρωτικά Παραμετρικά – Κατανεμημένα Παραμετρικά.**

**α. Συγκεντρωτικά Παραμετρικά:** Αγνοούν χωρικές διακυμάνσεις σε όλο το σύνολο του συστήματος, π.χ. το U.H. δίνει προβλέψεις για περιοχές με ομογενή στράγγιση,  $t_c$ =σταθερό.

**β. Κατανεμημένα Παραμετρικά:** Υπολογίζουν διακυμάνσεις συμπεριφοράς ενός φαινομένου σε κάθε σημείο του συστήματος, π.χ. διακυμάνσεις υπόγειας στάθμης νερού στην αποθήκευση και την διαπερατότητα.

#### **6<sup>η</sup> Μοντέλα «Μαύρου Κουτιού» – Μοντέλα Παρομοίωσης Δομής.**

**α. Μοντέλα Μαύρου Κουτιού (Black Box):** Δέχονται εισαγόμενα δεδομένα και τα μετατρέπουν σε εξαγόμενα δεδομένα χρησιμοποιώντας τεχνικές οι οποίες έχουν ελάχιστα ή καθόλου γνωστή φυσική βάση.

**β. Μοντέλα Παρομοίωσης Δομής:** Χρησιμοποιούν σημαίνοντες αρχές της μηχανικής ρευστών και της υδραυλικής για να προσομοιώσει τις μετατροπές στα δεδομένα.

#### **7<sup>η</sup> Στοχαστικά Μοντέλα – Αιτιοκρατικά Μοντέλα.**

**α. Στοχαστικά Μοντέλα:** Λαμβάνουν υπόψη όλες τις τυχαίες παραμέτρους ή εισαγόμενα δεδομένα.

**β. Αιτιοκρατικά Μοντέλα:** Περιγράφουν τη συμπεριφορά του υδρολογικού κύκλου με μαθηματικές εξισώσεις, υπογραμμίζοντας τις αλληλεπιδράσεις των διαφόρων φάσεων του υδρολογικού κύκλου.

#### **8<sup>η</sup> Μοντέλα Προσομοίωσης Γεγονότος – Μοντέλα Αλληλουχίας.**

**α. Μοντέλα Προσομοίωσης Γεγονότος:** Π.χ. το HEC-1 το οποίο επιτρέπει μεγαλύτερη ευχέρεια χρήσης των κατανεμημένων παραμέτρων και μικρότερα χρονικά διαστήματα.

**β. Μοντέλα Αλληλουχίας:** Μοντέλα τα οποία εξετάζουν διαδοχικά τα φαινόμενα.

## **2.4 Υδρολογικά μοντέλα**

Το υδρολογικό μοντέλο ορίζεται σαν ένα σύνολο μαθηματικών εξισώσεων ή το εξαγόμενο αποτέλεσμα μαθηματικών εξισώσεων οι οποίες απεικονίζουν τις φυσικές διαδικασίες ή το κατά προσέγγιση σύνολο των αλληλοσυσχετιζόμενων φαινομένων που υπεισέρχονται στη διαδικασία μετατροπής της βροχής σε απορροή. Τα εισαγωγικά δεδομένα ενός υδρολογικού μοντέλου είναι οι μετεωρολογικές μεταβλητές (κατακρημνίσεις, θερμοκρασία, άνεμος, κλπ.).

Κατά τη διαδικασία της προσομοίωσης ενός ολόκληρου ή μέρους ενός επιφανειακού ή υπόγειου υδρολογικού συστήματος, απαραίτητη προϋπόθεση είναι η χρήση ψηφιακών υπολογιστικών μεθόδων κατά τρόπον ώστε να

προσομοιώνονται πεπερασμένα γεγονότα είτε να γίνεται πρόβλεψη για τη μελλοντική συμπεριφορά του φυσικού συστήματος κάτω από συγκεκριμένες καταστάσεις ή συνθήκες. Τα υδρολογικά μοντέλα μπορούν να ταξινομηθούν στις παρακάτω κατηγορίες:

1) Τα μοντέλα ενός μεμονωμένου υδρολογικού γεγονότος, που περιλαμβάνουν ως εισαγωγικά δεδομένα ένα μεμονωμένο γεγονός βροχής και το εξαγόμενο αποτέλεσμα είναι ένα υδρογράφημα πλημμύρας.

2) Τα συνεχή μοντέλα που περιλαμβάνουν ως εισαγωγικά δεδομένα μια ή περισσότερες σειρές παρατηρήσεων στο χρόνο (χρονοσειρές) μίας ή περισσότερων μετεωρολογικών μεταβλητών.

3) Τα ενιαία ή αδρομερή μοντέλα που βασίζονται στην υπόθεση της ομοιόμορφης κατανομής στην επιφάνεια της λεκάνης απορροής των μεγεθών εισόδου (βροχή, κλπ.) και εξόδου (απορροή).

4) Τα κατανεμημένα μοντέλα, σε αντίθεση με τα ενιαία, βασίζονται στην υπόθεση της χωρικής κατανομής των μεγεθών εισόδου και εξόδου στην λεκάνη απορροής. Τα μοντέλα αυτά περιλαμβάνουν το διαχωρισμό της λεκάνης σε τμήματα με ανομοιόμορφα τοπογραφικά ή άλλα χαρακτηριστικά.

#### • Ταξινόμηση των Συνεχών Μοντέλων

Τα συνεχή μοντέλα βροχής-απορροής μπορούν να ταξινομηθούν με βάση δύο κριτήρια:

1. Το κριτήριο του είδους των εξισώσεων. Με βάση το κριτήριο αυτό τα μοντέλα ταξινομούνται σε φυσικά ή φυσικής βάσης (physically-based), παραμετρικά ή εννοιολογικά (conceptual) και μοντέλα μαύρου κουτιού (black-box).

2. Το κριτήριο που βασίζεται στο αν λαμβάνεται υπ'όψιν η τυχαιότητα των φαινομένων. Με βάση το κριτήριο αυτό τα μοντέλα ταξινομούνται σε προσδιοριστικά και στοχαστικά.

Τα προσδιοριστικά φυσικά μοντέλα βασίζονται στις εξισώσεις της φυσικής δηλαδή στις εξισώσεις συνέχειας και ποσότητας κίνησης. Τα μοντέλα αυτά περιλαμβάνουν ένα σύνολο περίπλοκων μαθηματικών εξισώσεων και συνήθως περιλαμβάνουν ένα μεγάλο αριθμό παραμέτρων. Επίσης τα μοντέλα αυτά απαιτούν πολλά δεδομένα εισόδου που συνήθως δεν είναι διαθέσιμα. Τέτοια μοντέλα έχουν εφαρμοσθεί μόνο σε μικρές πειραματικές λεκάνες απορροής, για τις οποίες υπάρχουν τα δεδομένα εισόδου (π.χ. SHE).

Τα προσδιοριστικά παραμετρικά μοντέλα προσομοιώνουν τη σχέση βροχής - απορροής βασιζόμενα σε ένα σύνολο απλουστευτικών παραδοχών του φυσικού συστήματος. Τα μοντέλα αυτά είναι πολύ διαδεδομένα και περιλαμβάνουν παραμέτρους οι οποίες καθορίζονται από τη διαδικασία "ρύθμισης" του μοντέλου. Η διαδικασία ρύθμισης ενός μοντέλου, είναι ένας αλγόριθμος ο οποίος συνίσταται στην αλλαγή των τιμών των παραμέτρων, έτσι ώστε οι διαφορές μεταξύ των προσομοιωμένων και των παρατηρημένων παροχών να είναι όσο το δυνατόν μικρότερες (π.χ. Stanford IV, Sacramento, U.B.C.).

Τα προσδιοριστικά μοντέλα "μαύρου κουτιού" βασίζονται σε απλές μαθηματικές εξισώσεις οι οποίες προσομοιώνουν ικανοποιητικά το υδρογράφημα της μετρούμενης παροχής. Ένα παράδειγμα τέτοιου μοντέλου είναι το μοναδιαίο υδρογράφημα.

Τα στοχαστικά μοντέλα "μαύρου κουτιού" είναι μοντέλα τα οποία υπολογίζουν τη μεταβλητή εξόδου (απορροή) λαμβάνοντας υπ'όψιν τα

στατιστικά χαρακτηριστικά της μεταβλητής εισόδου (βροχή), υπό τον όρο να διατηρούνται τα στατιστικά χαρακτηριστικά της μετρημένης παροχής (π.χ. μέσος, διασπορά, αυτοσυσχέτιση, κλπ.) (π.χ. μοντέλο ARIMA).

Τα στοχαστικά παραμετρικά και φυσικά μοντέλα λαμβάνουν υπ' όψιν τα στατιστικά χαρακτηριστικά της εισόδου (βροχή) και συγχρόνως περιλαμβάνουν εξισώσεις που απεικονίζουν τις βασικές διαδικασίες μετασχηματισμού της βροχής σε απορροή. Τέτοια μοντέλα δεν έχουν ακόμα εφαρμοσθεί σε πραγματικές λεκάνες απορροής και βρίσκονται ακόμα σε στάδιο έρευνας.

## 2.5 Μοντελοποίηση και παραμετροποίηση.

Στην παρούσα εργασία γίνεται αναφορά σε μοντέλα, είτε φαινολογικά είτε μικρομετεωρολογικά είτε μετεωρολογικά, αναφέρονται επίσης τα προσδιοριστικά και τα στοχαστικά μοντέλα και γενικά γίνεται ιδιαίτερη μνεία σε κάποια από αυτά. Παρακάτω θα επιχειρηθεί να εξηγηθεί τι σημαίνει τελικά ο όρος μοντέλο και τι είναι η μοντελοποίηση.

Ένα μοντέλο είναι ένας τρόπος για να περιγραφεί και να γίνει ποσοτική πρόγνωση/πρόβλεψη φυσικών φαινομένων. Είναι ένας πολύπλοκος τρόπος για προσομοίωση της πραγματικότητας, δημιουργώντας και δοκιμάζοντας υποθέσεις συνδέοντας ποσοτικά μετρούμενες ενότητες. Ο Addiscott (1993) ασχολήθηκε με μοντέλα εδάφους και περιγράφει ένα μοντέλο εδάφους συνδέοντας διάφορες εξισώσεις σαν μια εκτεταμένη υπόθεση. Αναφέρει ότι τέτοιες εκτεταμένες υποθέσεις πρέπει να δοκιμάζονται και να αντιπαρατίθενται με μετρήσεις, σύμφωνα με τους κανόνες της υποθετικο-επαγωγικής μεθόδου. Αυτό ονομάζεται επαλήθευση του μοντέλου.

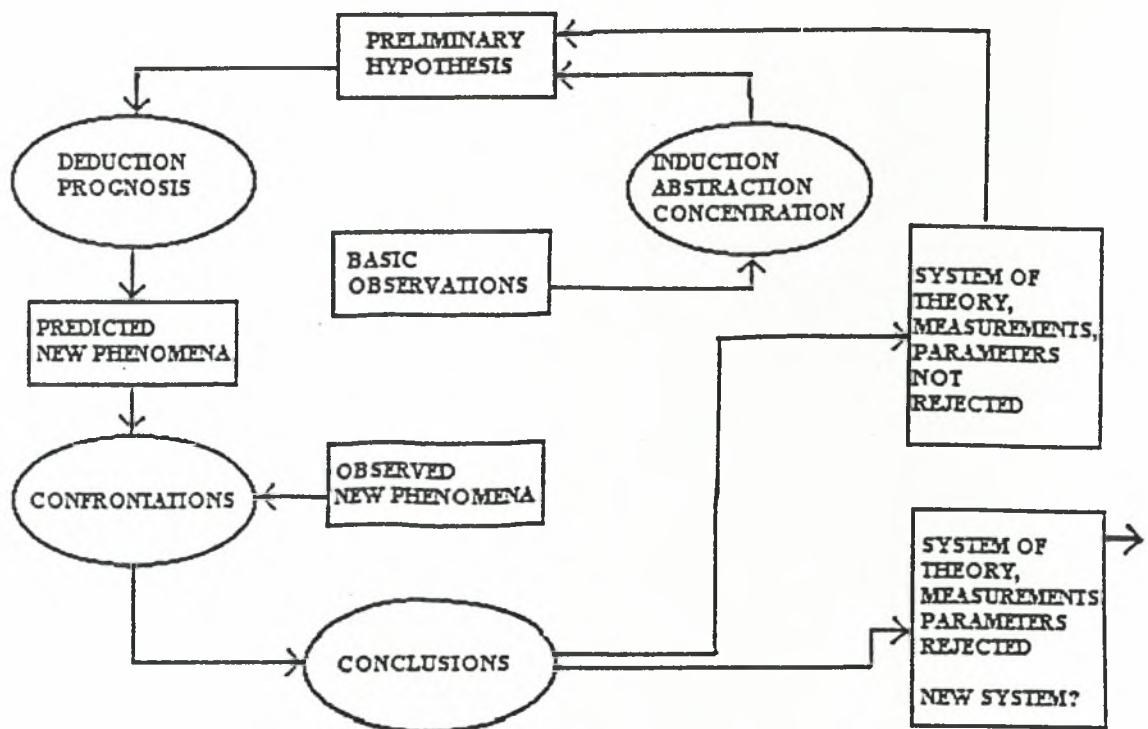
**Υποθετικο-επαγωγική μέθοδος.** Η υποθετικο-επαγωγική μέθοδος εμφανίζεται τον 16ο και τον 17ο αιώνα. Είναι η αναγνωρισμένη μέθοδος για την δημιουργία θεωριών στην επιστήμη. Η μέθοδος χρησιμοποιήθηκε κατ' αρχήν στη φυσική και στη συνέχεια στη χημεία, στη βιολογία, στην ιατρική, κ.α.

Με αυτή τη μέθοδο, προκαταρκτικές παρατηρήσεις χρησιμοποιούνται για να κατασκευαστούν υποθέσεις γύρω από φυσικά φαινόμενα. Οι υποθέσεις οφείλουν να κατασκευαστούν με τη χρήση των μαθηματικών και το περιεχόμενό τους μπορεί, για παράδειγμα, να είναι η εξέλιξη ενός φαινομένου μέσα στο χρόνο. Με τη χρήση των μαθηματικών, δηλαδή με λογικές επαγωγές βάση συγκεκριμένων υποθέσεων, η κατάσταση του φαινομένου μπορεί να προβλεφθεί για μια μεταγενέστερη χρονική στιγμή.

Η υπόθεση είναι συνήθως μαθηματικά σχηματοποιημένη και περιέχει ποσοτικά μετρούμενες ενότητες. Η υπόθεση είναι η θεωρία μας και από τις μετρήσεις της σωστής ενότητας σε δύο διαφορετικές χρονικές στιγμές η θεωρία και οι προβλέψεις έρχονται σε αντιπαράθεση με τις μετρήσεις ή τις παρατηρήσεις, και τότε η θεωρία, συμπεριλαμβανομένου του τρόπου που λαμβάνονται οι μετρήσεις και κατασκευάζονται οι παράμετροι, επιβεβαιώνεται ή απορρίπτεται. Βασικές υποθέσεις γύρω από φυσικά φαινόμενα συχνά ονομάζονται φυσικοί νόμοι.

Αυτό το σύστημα μπορεί να περιγραφεί από το σχήμα 2.2 το οποίο προέρχεται από ένα άρθρο του Godske (1966) και το οποίο είναι ευρέως αποδεκτό. Οι ποσοτικές ενότητες που περιλαμβάνονται στην υπόθεσή μας ονομάζονται συνήθως παράμετροι. Είναι μετρήσιμες και μπορούμε να τους δώσουμε αριθμητικές τιμές με τη χρησιμοποίηση οργάνων.





**Σχήμα 2.2** Διάγραμμα που παρουσιάζει την υποθετικο-επαγωγική μέθοδο.



Μερικές παράμετροι είναι πολύ πιο δύσκολο να μετρηθούν από άλλες και το μόνο που είναι εφικτό είναι να τους δώσουμε ανακριβείς αριθμητικές τιμές. Όλες οι παράμετροι λαμβάνουν τιμές μέσα σε ένα συγκεκριμένο εύρος. Αυτό σημαίνει ότι οι μετρήσεις και οι υπολογισμοί που προκύπτουν είναι ανακριβείς ως ένα βαθμό.

Συχνά οι καθορισμένες παράμετροι είναι στατιστικές ενότητες που καθορίζονται με διαφορετικές πιθανότητες μέσα σε ένα δεδομένο εύρος. Η ποσοτικοποίηση και η παραμετροποίηση της πραγματικότητας είναι ένα ατελείωτο έργο. Η υποθετικο-επαγωγική αρχή μπορεί να έχει αξία μόνο όταν αναφέρεται σε γεγονότα που περιγράφονται από μετρήσιμες παραμέτρους.

Μερικές γενικές απόψεις γύρω από τα μοντέλα, συμβατές με την υποθετικο-επαγωγική αρχή, δίνονται παρακάτω:

- Το σύμπαν είναι ένα σύνολο που δεν μπορεί να χωριστεί από τη δική μας συνείδηση. Δηλαδή, ο κόσμος δεν είναι μια αφηρημένη έννοια, ούτε διέπεται από αφηρημένες ιδέες ή εξισώσεις.

- Συγκρίνοντας δύο φυσικά συστήματα, ένα γνωστό και ένα άγνωστο, μπορεί να αποκτηθούν γενικές ποσοτικές γνώσεις γύρω από το σύμπαν. Πραγματοποιούνται μετρήσεις.

- Οι ποσοτικές ενότητες μπορούν να περιγραφούν και να μετασχηματισθούν ακολουθώντας τη λογική και τα μαθηματικά σύμφωνα με πολύ αυστηρούς κανόνες. Είναι δυνατό εν μέρει να περιγραφεί η πραγματικότητα και να γίνει μελλοντική πρόγνωση ενός φαινομένου χρησιμοποιώντας μαθηματικές εξισώσεις και καλά γνωστές αρχικές τιμές.

- Οι υποθέσεις δίνονται με μαθηματικές εξισώσεις, συχνά διαφορικές, χρησιμοποιώντας τις χρονικές συντεταγμένες του Γαλιλαίου και τις Καρτεσιανές χωρικές συντεταγμένες.

- Πιθανότατα δεν είναι δυνατόν να κατασκευαστούν και να δοκιμαστούν υποθέσεις που να περιγράφουν όλα τα φυσικά φαινόμενα που παρατηρούνται στον κόσμο. Οι υποθέσεις που είναι δυνατό να δοκιμαστούν βασίζονται ισχυρά στη χρονική και χωρική κλίμακα που λαμβάνεται υπόψη.

**Παραμετροποίηση και κλίμακα.** Οι μετρήσεις και η παραμετροποίηση είναι πολύ στενά συνδεδεμένες. Οι μετρήσεις είναι η βασική σύγκριση μεταξύ γνωστών και αγνώστων συστημάτων. Οι αριθμητικές ποσότητες που χρησιμοποιούνται στα μοντέλα και στις φυσικο-βιολογικές εξισώσεις καλούνται παράμετροι. Τα μέρη της πραγματικότητας που θεωρούνται στα μοντέλα παραμετροποιούνται. Θα πρέπει να δοθούν ορισμένες έννοιες και κριτήρια για κάθε παράμετρο που χρησιμοποιείται στο φυσικό – βιολογικό αυτό απόσπασμα.

Η παράμετρος πρέπει να είναι καλά προσδιορισμένη, είτε σαν ένα διάστημα που αντιπροσωπεύει το σύνολο κάποιων φυσικών αντικειμένων, είτε σαν αληθινός αριθμός που αντιπροσωπεύει το αποτέλεσμα μιας μέτρησης. Οι μονάδες μέτρησης πρέπει να ανήκουν στις γνωστές φυσικές ποσότητες ή να είναι αδιάστατοι αριθμοί.

Η χρονική και η χωρική κλίμακα πρέπει να είναι ακριβείς και σωστά προσδιορισμένες. Με αυτό τον τρόπο επιτυγχάνεται η αντιπροσωπευτικότητα της παραμέτρου.

Η διαδικασία ή οι διαδικασίες των μετρήσεων πρέπει να περιγράφονται επαρκώς. Μερικές φορές χρησιμοποιούμε μαθηματικές εξισώσεις για να αποκτήσουμε την τιμή μιας παραμέτρου από μια άλλη παράμετρο. Είναι επίσης πιθανό να μετασχηματίζουμε τις μετρήσεις από μια κλίμακα σε μια άλλη

κλίμακα. Σε αυτές τις περιπτώσεις πρέπει να χρησιμοποιούνται επιτρεπόμενες διαδικασίες που δίνουν τελικά το επιθυμητό αποτέλεσμα.

Μερικές φορές μια παράμετρος μπορεί να προσδιοριστεί κατά την ώρα λειτουργίας της ( μάζα θερμοκρασία κ.α.)

Δύο η περισσότερες επαναλήψεις μετρήσεων της ίδιας παραμέτρου δίνουν παρόμοιες τιμές μέσα στα πλαίσια προκαθορισμένων ορίων.

Το συμπέρασμα είναι ότι ο προσδιορισμός της παραμέτρου, η υπόθεση που χρησιμοποιείται, οι χωρικές και χρονικές κλίμακες που λαμβάνονται υπόψη και οι διαδικασίες των μετρήσεων, είναι στενά συνδεδεμένα. Και παρόλο που μπορεί να είναι δυνατό να παρουσιαστούν ποιοτικές σχέσεις, είναι πιθανό να μη μπορεί να χρησιμοποιηθούν σε ένα μοντέλο.

## 2.6 Μετεωρολογικά δεδομένα

Οι πηγές μετεωρολογικών δεδομένων κατάλληλων για χρήση σε μοντέλα είναι μετρήσεις μετεωρολογικών σταθμών, αριθμητικοί υπολογισμοί παραμέτρων που προκύπτουν από τη χρήση μετεωρολογικών δεδομένων, και αριθμητικές προγνώσεις καιρού. Όλες οι Ευρωπαϊκές χώρες έχουν ένα ή περισσότερα δίκτυα μετεωρολογικών σταθμών, και πάντα ένα κεντρικό εθνικό μετεωρολογικό δίκτυο. Γενικά, οι σταθμοί χωρίζονται σε 4 τύπους (COST ACTION 711, 1996):

**Τύπος 1:** Σταθμός κατακρημνισμάτων, με μετρήσεις βροχόπτωσης και χιονόπτωσης. Θερμοκρασίες σε οθόνη Stevenson.

**Τύπος 2:** Κλιματολογικοί σταθμοί, με μετρήσεις σε κατακρημνίσματα και θερμοκρασία αέρα.

**Τύπος 3:** Σταθμός εξάτμισης με μετρήσεις σε κατακρημνίσματα, θερμοκρασία αέρα, υγρασία, ηλιοφάνεια και εξάτμιση ή ταχύτητα αέρα στα 2 μέτρα από τη γη.

**Τύπος 4:** Αγρομετεωρολογικός σταθμός, με τις μετρήσεις του Τύπου 2 (τουλάχιστον 3 φορές ημερησίως) μαζί με 3 τουλάχιστον από τα παρακάτω: ολική ακτινοβολία, διαχεόμενη ακτινοβολία, θερμοκρασία 'επιφανειών', εδαφική υγρασία, εξάτμιση, υγρασία φυλλικής επιφάνειας, κ.α.

Δεν είναι όλοι οι τύποι σταθμών κατάλληλοι για αγρομετεωρολογικούς σκοπούς. Πρέπει να είναι τοποθετημένοι στην ύπαιθρο, κοντά στις καλλιέργειες. Οι μετρήσεις καταγράφονται σε τακτά χρονικά διαστήματα μέσα στην ημέρα με το χέρι ή, σε πιο αυτοματοποιημένους σταθμούς, λαμβάνονται οι μέσες ωριαίες τιμές των παραμέτρων. Οι αυτόματοι σταθμοί μπορούν να είναι συνδεδεμένοι μέσω τηλεφώνου ή modem με άλλα σημεία όπου και συγκεντρώνονται οι βάσεις δεδομένων.

Μαζί με τις μετεωρολογικές μετρήσεις, οι οποίες λαμβάνονται σε σταθερές θέσεις μπορεί για μικρότερες χρονικές περιόδους να οργανωθούν αγρομετεωρολογικά πειράματα σε εκτάσεις με χρήση πολλών οργάνων. Τέτοιες μετρήσεις χρησιμοποιούνται και για τους σκοπούς των μοντέλων.

**Ποιότητα, ακρίβεια και αντιπροσωπευτικότητα των μετεωρολογικών δεδομένων.** Καταρχήν, γίνεται αναφορά σε μετρήσεις μετεωρολογικών παραμέτρων από σταθμούς που βρίσκονται μόνιμα σε αγροτικές τοποθεσίες. Οι περισσότερες μετρήσεις λαμβάνονται σε ύψος 1,5-2

μέτρα από την επιφάνεια της γης. Η οριζόντια ταχύτητα του ανέμου πρέπει να καταμετρηθεί σε ύψος 10 μέτρων για να είναι αντιπροσωπευτική.

Οι παρακάτω μετεωρολογικές παράμετροι είναι αυτές που μετρούνται πιο συχνά:

- θερμοκρασία αέρα,
- κατακρημνίσματα,
- σχετική υγρασία του αέρα,
- ταχύτητα του αέρα και
- ολική ακτινοβολία.

Επίσης μπορούν ακόμα να μετρηθούν η υγρασία της φυλλικής επιφάνειας, οι ώρες άμεσης ηλιοφάνειας, η καθαρή ακτινοβολία, η θερμοκρασία του εδάφους σε διάφορα βάθη, το υγρασιακό καθεστώς του εδάφους, η ροή θερμότητας του εδάφους, η κατεύθυνση του ανέμου και το βάθος του χιονιού. Συνήθως καταγράφονται οι μέγιστες και οι ελάχιστες τιμές καθώς και οι μέσες ωριαίες τιμές κάθε παραμέτρου.

Μπορεί να καθορισθεί επίσης η ποιότητα των δεδομένων σε σχέση με την ακρίβειά τους, την ολότητα και την κανονικότητά τους, την αντιπροσωπευτικότητά τους και την διαθεσιμότητά τους. Τα δεδομένα πρέπει να είναι ακριβή γι' αυτό και τα όργανα και οι σένσορές τους πρέπει να έχουν την απαιτούμενη ακρίβεια και ευαισθησία. Επίσης τα όργανα πρέπει να έχουν βαθμονομηθεί κατάλληλα και να συντηρούνται διότι η ακρίβειά τους αλλάζει με το χρόνο. Οι σταθμοί είναι καλό να παραμένουν στην αρχική τους θέση για πολλά χρόνια για να υπάρχει μια αντιπροσωπευτική άποψη για το κλίμα και τις αλλαγές τους.

Οι σειρές των δεδομένων πρέπει να είναι ολοκληρωμένες, κανονικές και αντιπροσωπευτικές για την ευρύτερη περιοχή του σταθμού από τον οποίον προέρχεται. Εξίσου σημαντική για την ποιότητα των δεδομένων είναι και η διαθεσιμότητά τους, διότι θα πρέπει να είναι διαθέσιμα το συντομότερο δυνατόν μετά τη καταγραφή τους προς χρήση σε μοντέλα πρόγνωσης.

## 2.7 Απαιτήσεις ακρίβειας στα μοντέλα. Μοντέλα ανάπτυξης παραγωγής

Τα μοντέλα παραγωγής είναι προσεγγίσεις της πραγματικότητας και συνήθως προβλέπουν την ανάπτυξη της παραγωγής (με προσομοίωση) και την παραγωγή ξηρής μάζας. Η πρόγνωση της παραγωγής είναι αποτέλεσμα επιδράσεων οικολογικών και οικονομικών παραγόντων. Σε αυτή την ανάλυση ασχολούμαστε με τους φυσικούς περιβαλλοντικούς παράγοντες οι οποίοι δημιουργούν τη βάση του μοντέλου. Υπάρχουν διάφοροι τύποι μοντέλων για πρόγνωση παραγωγής όπως στατιστικά και αιτιοκρατικά μοντέλα.

Τα μοντέλα πρόγνωσης παραγωγής είναι συνήθως σχεδιασμένα σαν ένα σύστημα που περιγράφει και αναλύει το βασικό φαινόμενο της διαδικασίας. Τέτοια μοντέλα μπορούν να δομηθούν σαν στοχαστικά και/ή αιτιοκρατικά, εμπειρικά και/ή μηχανικά. Τα παρακάτω γενικά βήματα προτείνονται για την δημιουργία ενός μοντέλου πρόγνωσης παραγωγής:

-Ανάλυση της διαδικασίας - καθορισμός του βασικού φαινομένου.

-Καθορισμός του συστήματος και των ορίων του.

-Ανάπτυξη της δομής του μοντέλου με επαρκή ακρίβεια για τις άγνωστες παραμέτρους, δημιουργία του αλγορίθμου του μοντέλου.

-Ταυτοποίηση των παραμέτρων για το μοντέλο σε σχέση με τα διαθέσιμα στοιχεία και καθορισμός του εύρους των εισαγόμενων και εξαγομένων μεταβλητών.

-Δοκιμή της επάρκειας του μοντέλου μέσω της ανάλυσης των αποτελεσμάτων αριθμητικών πειραμάτων για την συνολική διαδικασία ανάπτυξης του μοντέλου.

Η αβεβαιότητα μπορεί να εισαχθεί στο μοντέλο σε κάθε στάδιο της κατασκευής του μοντέλου και κάθε μοντέλο χρεώνεται με κάποια αβεβαιότητα.

Η ζητούμενη ακρίβεια των διαφόρων αποτελεσμάτων των μοντέλων τελικά καθορίζεται από το σκοπό της πρακτικής τους χρήσης. Οι πιο συχνές χρήσεις των μοντέλων είναι οι παρακάτω:

1) Πρόβλεψη της παραγωγής. Το ζητούμενο είναι ακριβής πρόβλεψη της τελικής παραγόμενης βιομάζας.

2) Χρήση σε πρακτικές καλλιέργειας. Τα ζητούμενα είναι η χρονική διάρκεια και τα στάδια ανάπτυξης της παραγωγής.

3) Έρευνα. Όλες οι σχέσεις των διαφόρων περιβαλλοντικών φαινομένων και οι επιδράσεις τους στην παραγωγή μελετούνται.

4) Εφαρμογή των μοντέλων σε συγκεκριμένες καλλιέργειες και συνθήκες.

Οι απαιτήσεις σε δεδομένα του μοντέλου καθορίζουν τα εισαγόμενα. Όταν το μοντέλο χρησιμοποιείται τοπικά, χρησιμοποιούνται δεδομένα του τοπικού μετεωρολογικού δικτύου, δεδομένα παραγωγής από τις γεωργικές εφαρμογές ή από φαινολογικές παρατηρήσεις. Αυτό δημιουργεί προβλήματα έλλειψης δεδομένων αλλά και αβεβαιότητα για την ποιότητά τους. Γι' αυτό είναι σημαντικό να τηρούνται κάποιοι περιορισμοί κατά την εισαγωγή των δεδομένων στο μοντέλο. Η γενική σύσταση από το CagM γύρω από την ακρίβεια των παραμέτρων καιρού είναι η παρακάτω (WMO/ TD-No.629, CagM, No.60):

Παράμετρος	Απαιτούμενη Ακρίβεια
Εξάτμιση	$\pm 1\text{mm}$
Ηλιοφάνεια	10% ( $\pm 0.1\text{h}$ )
Φωτοπερίοδος	10% ( $\pm 0.1\text{h}$ )
Βροχόπτωση	$\pm 1\text{mm}$
Σχετική Υγρασία	$\pm 5\%$
Θερμοκρασία	0.5-1°C
Ταχύτητα ανέμου	$\pm 0.5\text{m/s}$

Αυτή η προτεινόμενη ακρίβεια προσδιορίζεται συνήθως στο σημείο των μετρήσεων, σε συνοπτικά, κλιματολογικά και αυτοματοποιημένα δίκτυα. Υπάρχουν βέβαια και μοντέλα που απαιτούν πιο ιδιαίτερες παραμέτρους και άλλα που απαιτούν πολύ μεγαλύτερη ακρίβεια στις μετρήσεις των παραπάνω παραμέτρων.

Η ανακρίβεια των εισαγόμενων μπορεί να προκαλέσει ποικίλες αλλαγές στα εξαγόμενα. Γενικά τα δεδομένα δεν είναι ανεξάρτητα μεταξύ τους. Η αλληλεπίδραση μεταξύ τους μπορεί να διερευνηθεί με τη χρήση παραγοντικής



ανάλυσης ευαισθησίας όταν το μοντέλο 'τρέχει' για χαμηλά και υψηλά επίπεδα παραμέτρων. Αυτή η προσέγγιση απαιτεί πρόσθετα 'τρεξίματα' ανάλογα με τον αριθμό των παραμέτρων.

Παράμετρος	Αναφερόμενη Ανάλυση	Απαιτούμενη Ακρίβεια
Ολική ακτινοβολία	$1 \text{ MJm}^{-2}\text{d}^{-1}$	$\pm 0.4$ για $\leq 8 \text{ MJm}^{-2}\text{d}^{-1}$ $\pm 5$ για $> 8 \text{ MJm}^{-2}\text{d}^{-1}$
Θερμοκρασία εδάφους	$0.1^\circ\text{C}$	$0.1^\circ\text{C}$
Ελάχιστη θερμοκρασία Φυτοκάλυψης (5cm)	$0.5^\circ\text{C}$	$0.5^\circ\text{C}$
Ημερήσια διαδρομή ανέμου	1 Km	1 Km
Εδαφική υγρασία	1% κατ'όγκο	2% κατ'όγκο
Ένταση βροχόπτωσης	1mm/h	1mm/h
Υδατικό ισοδύναμο χιονιού	1mm	1mm
Διάρκεια υγρασίας φυτοκάλυψης	0.2h	0.2h
Διάρκεια δρόσου	0.2h	0.2h

Η παραλλακτικότητα των μεταβλητών είναι ένας ακόμα λόγος αβεβαιότητας ενός μοντέλου. Οι συντελεστές αναλογίας μπορούν να αποκτηθούν με δύο τρόπους, σαν χρονικά μεταβαλλόμενες τιμές ή σαν σταθερές. Στα μοντέλα που βασίζονται σε χρονικά μεταβαλλόμενες προσομοιώσεις, οι συντελεστές αναλογίας μπορούν να αλλάξουν σημαντικά και η κατανομή πιθανότητάς τους μπορεί να εκφράσει το εύρος τους πολύ καλύτερα από μια σταθερή παράμετρο. Όμως, παρόλο που οι σταθερές παράμετροι εισάγουν μεγαλύτερα ποσοστά αβεβαιότητας, απλοποιούν το μοντέλο. Η ανάλυση ευαισθησίας και η προσομοίωση 'Μόντε Κάρλο' χρησιμοποιούνται συνήθως για να ερευνηθεί το ποσοστό αβεβαιότητας ενός μοντέλου λόγω των παραμέτρων.

## 2.8 Βαθμονόμηση και πιστοποίηση των μοντέλων

Η πολυπλοκότητα της βαθμονόμησης των φαινολογικών μοντέλων προέρχεται από τον αριθμό των παραμέτρων και τις σχέσεις μεταξύ τους, που πρέπει να διερευνηθούν πριν το μοντέλο μπορεί να υιοθετηθεί στην περιοχή στην οποία αναφέρεται. Η διαδικασία βελτιστοποίησης μπορεί να επιτευχθεί με διαφορετικούς τρόπους είτε εμπειρικά, αλλάζοντας μια ομάδα παραμέτρων ανεξάρτητα από τις άλλες, είτε με διαδικασίες βελτιστοποίησης χρησιμοποιώντας μέγιστες εκτιμήσεις πιθανοτήτων.

Η τελευταία μέθοδος απαιτεί μεγάλα δείγματα δεδομένων σε σχέση με τον αριθμό των παραμέτρων υπό εκτίμηση. Τα φαινολογικά στάδια δεν είναι

απαραίτητα ανεξάρτητα μεταξύ τους, οπότε και οι τιμές των παραμέτρων για τα διάφορα στάδια πρέπει να εκτιμηθούν ταυτόχρονα, πράγμα που προσθέτει επιπλέον πολυπλοκότητα στο πρόβλημα.

Σαν ένα κριτήριο για την παρουσίαση ενός μοντέλου με διαφορετικές τιμές παραμέτρων, χρησιμοποιείται συνήθως το στάδιο της άνθησης. Αυτό το στάδιο έχει το πλεονέκτημα να μπορεί να καθοριστεί με μεγάλη ακρίβεια και εξαρτάται ελάχιστα από τις διακυμάνσεις του περιβάλλοντος. Ως βέλτιστες τιμές των παραμέτρων λαμβάνονται αυτές που ελαχιστοποιούν την υπολειμματική τυπική απόκλιση της φωτο-εαρινής-θερμικής περιόδου μεταξύ δύο φαινολογικών σταδίων, εκφρασμένες σαν ένα νούμερο με μονάδες και όχι σαν ένα ποσοστό του μέσου όρου.

Η αποτελεσματικότητα της βαθμονόμησης μπορεί επίσης να μετρηθεί από το τυπικό σφάλμα σε ημέρες, υπολογιζόμενες από τις αποκλίσεις μεταξύ των εκτιμήσεων του μοντέλου και των παρατηρούμενων ημερομηνιών των φαινολογικών σταδίων. Η μέση διαφορά μεταξύ παρατηρούμενων και προβλεπόμενων ημερομηνιών επίσης ελήφθη υπόψη κατά τον προσδιορισμό της εκτέλεσης του μοντέλου. Υποτίθεται ότι μια αμερόληπτη λύση μπορεί να επιτευχθεί με μια αποτελεσματική διαδικασία βαθμονόμησης.

Τα μοντέλα αντικατοπτρίζουν τη πραγματικότητα, δεν την αντιπροσωπεύουν όμως επακριβώς. Αυτό σημαίνει ότι το μοντέλο αντιστοιχεί στο πρωτότυπο σε κάποιους τομείς ενώ διαφέρει αρκετά από άλλους. Παρόλα αυτά όμως τα μοντέλα μπορούν να περιγράψουν κάποια φαινόμενα και επίσης να παρουσιάσει σχέσεις μεταξύ των φαινομένων. Μια σχετική αναλογία μεταξύ μοντέλου και πραγματικότητας υπάρχει σε διάφορα επίπεδα: στο επίπεδο των εισαγομένων, το επίπεδο των δομών που στο μοντέλο αντιπροσωπεύονται κυρίως από ένα σύστημα λειτουργιών και στο επίπεδο των στοιχείων αυτών των δομών.

Τα μοντέλα παραγωγής είναι συνήθως περίπλοκα συστήματα εξισώσεων που περιέχουν διάφορες ομάδες παραμέτρων και δεδομένων. Ο σκοπός, η τιμή και η κατανομή της απόκρισης των παραμέτρων πρέπει να είναι γνωστά. Ένας τρόπος για την ταυτοποίηση ενός μοντέλου είναι η χρησιμοποίηση γενικά αποδεκτών τιμών κατά τη βαθμονόμηση και η ανάλυση των εξαγομένων δεδομένων σύμφωνα με πειραματικά δεδομένα. Οι αποκλίσεις των δεδομένων προσομοίωσης από τα μετρηθέντα δεδομένα είναι το κριτήριο της πιστοποίησης μιας παραμέτρου και η ανάλυση αυτής της πιστοποίησης μπορεί να οδηγήσει σε νέες ρυθμίσεις της παραμέτρου.

Οι παράμετροι μπορεί ακόμα να αποκτηθούν με τη χρήση πειραματικών δεδομένων για την παραγωγή του μοντέλου και στη συνέχεια η προσαρμογή των παραμέτρων έτσι ώστε η προσομοίωση να συμπίπτει με τα αρχικά δεδομένα.

Για να δοκιμασθεί ένα μοντέλο για την ακρίβεια και την επάρκειά του, προτείνονται δύο βήματα, η πιστοποίηση και η επαλήθευση. Σαν επαλήθευση λαμβάνεται η διαδικασία κατά την οποία το μοντέλο υποβάλλεται στην εκτίμηση της λογικής του κατασκευής, η σύνταξη του προγράμματος και ο έλεγχος για συντακτικά λάθη. Σαν πιστοποίηση λαμβάνεται η διερεύνηση της ορθότητας και της καταλληλότητας του μοντέλου. Το να πιστοποιηθεί ένα μοντέλο δε σημαίνει μόνο το να συγκριθούν οι τιμές των πειραματικών ή στατιστικών και των εξαγομένων δεδομένων. Γενικά, η συμφωνία μεταξύ των προσομοιωμένων και των αληθινών δεδομένων είναι ένα μόνο βήμα πιστοποίησης.

Για να έχει νόημα η πιστοποίηση πρέπει να υποδηλώνει ότι τα εξαγόμενα από το μοντέλο δεδομένα είναι γενικώς συμβατά με αυτά με τα οποία συγκρίνονται και μπορούν να επεξηγηθούν με τις παραμέτρους οι οποίες χρησιμοποιήθηκαν από το μοντέλο. Καταρχήν είναι απαραίτητο να καθοριστεί ο βασικός στόχος του μοντέλου που είναι προς πιστοποίηση. Κατά συνέπεια, η δομή του μοντέλου και των συντελεστών του διερευνούνται ποιοτικά για το αν αντιστοιχούν επαρκώς στην υπόθεση του μοντέλου και στην ακρίβεια και επάρκεια των παραμέτρων, οπότε και οι μεταβλητές και τα εξαγόμενα πρέπει να αναλυθούν ποσοτικά.

Η πιστοποίηση ενός μοντέλου είναι πολυπλοκότερη διαδικασία από την επαλήθευσή του. Σε αυτό το στάδιο δύο ακραία γεγονότα μπορεί να συμβούν. Πρώτον, μπορεί ένα καλά δομημένο μοντέλο να παράγει κακής ποιότητας δεδομένα λόγω ενός ανεπαρκούς σταδίου απλοποίησης των συντελεστών του ή της παράλειψης κάποιων σημαντικών παραμέτρων ή μεταβλητών. Έτσι ο βαθμός ακρίβειας του μοντέλου είναι χαμηλός και πρέπει να εκτιμηθούν επιπλέον μεταβλητές. Από την άλλη, ένα περίπλοκο μοντέλο με άφθονες παραμέτρους οδηγεί στην απόκτηση μεγάλου αριθμού σφαλμάτων και μεγαλύτερου βαθμού αβεβαιότητας.

Για να πιστοποιηθεί ένα μοντέλο, προτείνονται τα παρακάτω βήματα:

1. - 'Τρέξιμο' του μοντέλου για ακραίες τιμές δεδομένων.
2. - 'Τρέξιμο' του μοντέλου με ανεξάρτητες ομάδες εισαγομένων και σύγκριση των εξαγομένων με εμπειρικά δεδομένα και διερεύνηση της καταλληλότητας της υπόθεσης που χρησιμοποιήθηκε κατά την κατασκευή του μοντέλου.
3. - Ανάλυση ευαισθησίας.
4. - Εκτίμηση των επιτρεπόμενων σφαλμάτων και της ακρίβειας ανάλογα με τον σκοπό του μοντέλου.

Το βασικό κριτήριο της πιστοποίησης είναι η σύγκριση των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης με εντελώς ανεξάρτητες σειρές δεδομένων. Ακόμα και με τη χρησιμοποίηση τέτοιων δεδομένων, το μοντέλο βαρύνεται με κάποια αβεβαιότητα λόγω της αβεβαιότητας των πειραματικών (στατιστικών) δεδομένων με τα οποία τα εξαγόμενα της προσομοίωσης συγκρίνονται.

Η πιστότητα της πιστοποίησης μπορεί να βελτιωθεί με τη χρήση διαφορετικών, ανεξάρτητων στατιστικών βάσεων δεδομένων ή με επαναλήψεις των μετρήσεων. Αυτό είναι συνήθως δυνατό όταν εξετάζεται ένα μοντέλο περιοχικά όπου και μπορούν να βρεθούν δεδομένα από διαφορετικές πηγές. Σε αυτές τις περιπτώσεις, η πλήρης συμφωνία μεταξύ των στατιστικών και των προσομοιωμένων δεδομένων δεν είναι συνήθως εφικτή, αλλά αυτό σχετίζεται και με τις αρχικές συνθήκες των πιστοποιημένων συντελεστών του μοντέλου.

Η ανακρίβεια των εισαγομένων δεδομένων μπορεί να δημιουργήσει διάφορες αλλαγές στα εξαγόμενα. Η ευαισθησία του μοντέλου μπορεί να ελεγχθεί με διάφορους τύπους ανάλυσης ευαισθησίας και πολλαπλά 'τρέξιμα' του μοντέλου όταν τα δεδομένα διαφέρουν. Ο σκοπός είναι να διερευνηθεί η επίδραση της παραλλακτικότητας στα εισαγόμενα δεδομένα και στο σχέδιο πάνω στον χαρακτήρα των εξαγομένων αποτελεσμάτων και να προσδιοριστεί το μέγεθος της αλλαγής των συγκεκριμένων δεδομένων.

μαθηματικών εξισώσεων οι οποίες απεικονίζουν κατά προσέγγιση το σύνολο των αλληλοσυσχετιζόμενων φαινομένων που υπεισέρχονται στη διαδικασία μετατροπής της βροχής σε απορροή. Τα εισαγωγικά δεδομένα ενός υδρολογικού μοντέλου είναι οι μετεωρολογικές μεταβλητές (κατακρημνίσεις,

θερμοκρασία, άνεμος, κλπ.). Το μοντέλο είναι ένα σύνολο μαθηματικών εξισώσεων που απεικονίζουν τις φυσικές διαδικασίες μετατροπής της βροχής σε απορροή, που είναι το εξαγόμενο αποτέλεσμα.

Κατά τη διαδικασία της προσομοίωσης ενός ολόκληρου ή μέρους ενός επιφανειακού ή υπόγειου υδρολογικού συστήματος, απαραίτητη προϋπόθεση είναι η χρήση ψηφιακών υπολογιστικών μεθόδων κατά τρόπον ώστε να προσομοιώνονται πεπερασμένα γεγονότα είτε να γίνεται πρόβλεψη για τη μελλοντική συμπεριφορά του φυσικού συστήματος κάτω από συγκεκριμένες καταστάσεις ή συνθήκες.

## 2.9 Βιβλιογραφία Κεφαλαίου 2

1. Baier W. 1973: Crop weather analysis models. Review and model development. J. Appl. Meteor. 12:937-947 pp.
2. Baker D. N., Lampert J.R., McKinion J.M. 1983: GOSSYM, a simulator of cotton crop growth and yield. South Carolina Exp. Sta. Tech. Bull 1089.
3. Curry R.B., Meyer G.E., Streeter J.D., Mederski J.M. 1980: Simulation of the vegetative and reproductive growth of soybeans. World Soybeans Res. Conf. 2 Westview Press Boulder, Co. 557-569 pp.
4. Dalezios N. R., Stamatopoulou I. 1996: The significance of meteorological indices in the phenology of maize in central Greece. International Symposium on Applied Agrometeorology and Agroclimatology. Volos 1996.
5. Fisher R.A. 1924: The influence of rainfall distribution on the yield of wheat at Rothamsted. Philosophical Transactions of the Royal Society Series B. 213: 89-142 pp.
6. Foong, S. F., 1980: Weather-based model for estimating oil palm fruit bunch yield. University of Guelph, M.Sc. Thesis.
7. Gosselt, J. W., and A. M. Sorensen, Jr. 1959. The effects of two levels of energy and seasons on reproductive phenomena of gilts. J. Animal Sci. 18: 40-47.
8. Holt, D. A., Bula, R. J., Miles, G. E., Schreiber, M. M. and Peart, R. M., 1975: Environmental physiology, modelling and simulation of alfalfa growth: I. Conceptual development of SIMED. Agricultural Experiment Station, Purdue University, West Lafayette, Indiana. Res. Bull. 901. 26 pp.
9. Lomas J. 1976: Meteorological requirements of the wheat crop. Proceedings of WMO Symp. Deutscher Wetterdienst. Offenbach A.M. Germany.
10. Primault, B., 1980: Choix des elements et de leurs limites dans l'etablissement de modeles biometeorologiques (The choice and limitations of parameter used in establishing biometeorological models). Bull. OEPP 10:53-59.
11. Tincker, M. A. H. 1925: Physiological pre-determination experiments with certain economic crops : The relation between rate of germination and subsequent growth. Ann. Appl. Biol. 12:440-471.



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3. ΜΕΘΟΔΟΙ ΠΡΩΤΗΣ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗΣ

### 3.1 Βασικές Αρχές

Η αγρομετεωρολογία εμπλέκεται σε όλα σχεδόν τα θέματα με τα οποία ασχολείται η γεωπονία. Εμπλέκεται και στις βιολογικές επιστήμες που σχετίζονται με φυτά και ζώα (όπως η κηπουρική και η ορνιθοτροφία ) αλλά και στις φυσικές επιστήμες όπως η φυσική του εδάφους και η υδρολογία .

Σε αυτό το ευρύ πεδίο, απαραίτητο βοήθημα για την έρευνα αποτελεί η χρήση ευφυών μεθόδων και σχεδίων. Εφόσον σε αυτή την εργασία σημασία έχει η μεθοδολογία, αναφέρονται μόνο ορισμένα από τα προβλήματα της εφαρμογής στατιστικών και μαθηματικών μεθόδων στις μελέτες των αντιδράσεων των καλλιεργειών. Το αν θα χρησιμοποιηθούν σωστά οι μέθοδοι και οι τύποι επεξεργασίας των περιβαλλοντικών δεδομένων εξαρτάται από τη γνώση ορισμένων θεμελιωδών προβληματισμών της αγρομετεωρολογίας.

Ο πρώτος στόχος είναι να γίνει κατανοητό το αντικείμενο κάθε κλάδου, τις διαφορές του από τους υπόλοιπους και τη σχέση του με αυτούς. Κατά τη μελέτη των αντιδράσεων των φυτών, για παράδειγμα, οι φυτοφυσιολόγοι ασχολούνται με μερικά μεμονωμένα καλλιεργούμενα φυτά ή ακόμη και με ένα μόνο συγκεκριμένο όργανο αυτών των φυτών. Οι αγρομετεωρολόγοι όμως ασχολούνται με έναν μεγάλο αριθμό φυτών, που καλύπτουν εκτάσεις πολλών στρεμμάτων.

Αν η θερμοκρασία του αέρα ή η υγρασία αποτελούν σημαντικά περιβαλλοντικά στοιχεία για μια συγκεκριμένη κρίσιμη περίοδο της ανάπτυξης του φυτού, θα χρειαστεί να υπάρχουν οι αντιπροσωπευτικές τιμές τους για ολόκληρη την καλλιεργούμενη έκταση, και όχι για ένα μόνο θερμοκήπιο.

Αν το εμβαδόν του φύλλου αποτελεί μέτρο για την μελέτη της αποδοτικότητας της φωτοσύνθεσης, πάλι θα πρέπει να υπολογισθεί το εμβαδόν όλων των φύλλων που αντιστοιχούν στο στρέμμα.

Το ιδανικό είναι να λαμβάνεται η μέση τιμή των περιβαλλοντικών μεγεθών για έναν τετραδιάστατο χώρο, καθώς τα σημειακά δεδομένα (point-source data) δεν είναι αντιπροσωπευτικά. Αυτό αποτελεί ένα παράδειγμα της διαφοροποίησης της προσέγγισής ανάλογα με τον κλάδο. Ωστόσο, οι νόμοι της φυσιολογίας σχετικά με την αύξηση και την ανάπτυξη των φυτών, οι οποίοι έχουν διατυπωθεί με ακρίβεια και προσοχή από τους φυτοφυσιολόγους, θα πρέπει να χρησιμοποιούνται ως πρώτο και θεμελιώδες υλικό από τους αγρομετεωρολόγους.

Όταν το έδαφος αποτελεί παράγοντα, η εδαφολογία και η φυσική του εδάφους θα πρέπει να είναι οι πρώτοι κλάδοι στους οποίους θα ανατρέξει ο ερευνητής. Οι αρχές, οι νόμοι, οι θεωρίες, αλλά και οι υποθέσεις που ισχύουν σε αυτούς τους κλάδους είναι σημαντικές για τη μαθηματική και στατιστική διατύπωση. Επίσης, αν αυτό είναι απαραίτητο, ο ερευνητής θα συμβουλευθεί και άλλους σχετικούς κλάδους, όπως η αγροβιολογία και η εδαφολογία. Αυτό αποτελεί παράδειγμα των λειτουργικών σχέσεων μεταξύ των κλάδων.

Άλλες βασικές αρχές, όπως η υπόθεση της σταθερότητας των βιοτικών παραγόντων, η αρχή της διαφοροποίησης μεταξύ αύξησης και ανάπτυξης, η θεωρία της φυσικής διαφοροποίησης και η αρχή της

φυσιολογικής προ-προσαρμογής, θα πρέπει επίσης να λαμβάνονται υπόψη στη στατιστική και μαθηματική ανάλυση.

Η υπόθεση της σταθερότητας των βιοτικών παραγόντων είναι απαραίτητη για την επεξεργασία φαινολογικών δεδομένων από την αγρομετεωρολογία, ιδιαίτερα όταν πρόκειται για μακροπρόθεσμα ιστορικά δεδομένα. Εφαρμόζοντας την υπόθεση αυτή, είναι δυνατό να διαχωριστούν οι μεταβλητές που ανάγονται σε βιοτικές επιδράσεις από αυτές που ανάγονται στο φυσικό περιβάλλον.

Παρακάτω δίνεται η μαθηματική διατύπωση ενός σταθερού μεγέθους. Χρησιμοποιώντας την πραγματική παραγωγή ( $Y_a$ ) την πραγματική μέση παραγωγή ( $\bar{Y}$ ), και τον τροποποιημένο συντελεστή ( $b$ ), δημιουργείται ένας απλός μαθηματικός τύπος. Έτσι, η τροποποιημένη απόκλιση ( $Y'd$ ) η οποία εκφράζει τη διαφορά οποιασδήποτε μεμονωμένης περίπτωσης ( $Y_i$ ) από τον τροποποιημένο αριθμητικό μέσο ( $\bar{Y}'d$ ), μπορεί να εκφραστεί ως:

$$Y'd = Y_a - (\bar{Y} + b). \quad (3-1)$$

Ο τροποποιημένος συντελεστής λαμβάνεται από την εξίσωση

$$b = K\sigma(2n_i - N)/N, \quad (3-2)$$

όπου  $K$  είναι οποιοδήποτε κλάσμα της τυπικής απόκλισης της μέσης παραγωγής  $\sigma$  είναι η τυπική απόκλιση της μέσης παραγωγής  $n_i$  είναι ο αριθμός των γραμμικών μονάδων που χρησιμοποιούνται, μετρώντας από το πρώτο έτος  $N$  είναι ο αριθμός των γραμμικών μονάδων μεταξύ του πρώτου και του τελευταίου έτους.

Για παραπέρα χρήση αυτής της υπόθεσης, θα πρέπει να αποφασισθεί ποιο μέγεθος θα χρησιμοποιηθεί έτσι ώστε να εξαλειφθεί η επίδραση βιοτικών λειτουργιών, όπως ο χρόνος ανθοφορίας και ωρίμανσης.

Όπως έχει προαναφερθεί, η εφαρμογή στον αγρό των αποτελεσμάτων που προέκυψαν από το θερμοκήπιο αποτελεί καθήκον του αγρομετεωρολόγου. Φυσικά, τα δεδομένα που προέρχονται από το θερμοκήπιο θα πρέπει να τροποποιηθούν σε κάποιο βαθμό, ώστε να είναι χρήσιμα και στις συνθήκες του αγρού. Αυτό είναι δυνατόν, αν εφαρμοστούν οι βασικές αρχές που αναφέρθηκαν παραπάνω.

### 3.2 Μέθοδοι πρώτης προσέγγισης

Η σύγχρονη στατιστική, και ιδίως η βιοστατιστική, αποτελεί ένα πολύ χρήσιμο εργαλείο στην ανάπτυξη της σύγχρονης αγρομετεωρολογίας, τονίζεται ότι η στατιστική αποτελεί εργαλείο και όχι μέθοδος επίλυσης των προβλημάτων. Η μέθοδος επίλυσης των προβλημάτων βασίζεται σε θεμελιώδεις αρχές που περιλαμβάνουν τους νόμους της φυσικής και τις αρχές της φυσιολογίας. Καθώς και στη χρήση αξιόπιστων οργάνων μέτρησης του μικροπεριβάλλοντος.

Το ποιες στατιστικές τεχνικές θα χρησιμοποιηθούν εξαρτάται από τον τύπο ή τη φύση του προβλήματος, την ποσότητα των δεδομένων, και τις μεθόδους υπολογισμού. Όταν το πρωτογενές υλικό είναι πολύ, ή όταν

πρόκειται για περίπλοκους και μακροσκελείς χειρισμούς, συνίσταται ο ηλεκτρονικός υπολογισμός.

Η στατιστική προσέγγιση ενός συγκεκριμένου προβλήματος προϋποθέτει προσεκτική εκτίμηση, ανάλυση και έλεγχο των πιθανοτήτων που λαμβάνονται υπόψη όταν επιχειρείται μία γενίκευση. Χρησιμοποιώντας τη στατιστική ως εργαλείο, δεν εξετάζονται μόνο κάποια στοιχεία, γίνονται κάποιοι υπολογισμοί και διατυπώνονται κάποια συμπεράσματα, αλλά είναι πολύ σημαντικό να ερευνάται πώς συλλέχθηκαν τα δεδομένα και πώς είχε σχεδιαστεί το όλο πείραμα ή η έρευνα.

Η μαθηματική προσέγγιση διαφέρει κάπως από την στατιστική, αν και είναι δύσκολο να καθοριστούν τα μεταξύ τους όρια, καθώς η πρώτη παρέχει αρχές, θεωρίες, νόμους ή ακόμη και μεθόδους στην δεύτερη. Ο κόσμος των μαθηματικών είναι σε μεγάλο μέρος του ένας φανταστικός κόσμος, που εκφράζεται από αριθμούς, σύμβολα, ευθείες, κύκλους, κτλ., και του οποίου ο πρακτικός σκοπός είναι να αποτελέσει το θεμέλιο των επιστημών.

Στην παρούσα φάση, τα διαθέσιμα δεδομένα σχετικά με τις καλλιέργειες και το περιβάλλον είναι ακόμη ανεπαρκή για να μπορούν να αξιοποιηθούν με ακρίβεια στατιστικά. Επίσης, δεν μπορούν να εκφραστούν στατιστικά όλα τα γεγονότα που σχετίζονται με την καλλιέργεια, ούτε διατίθενται επαρκή μικροκλιματικά περιβάλλοντα τα οποία να έχουν μετρηθεί σωστά. Ακόμη και αν υπήρχαν αυτά τα δεδομένα, δεν είναι ακόμη πλήρως γνωστοί οι υπόλοιποι παράγοντες, εκτός από τους περιβαλλοντικούς, που επηρεάζουν την αύξηση και την ανάπτυξη των καλλιεργειών. Απόρροια των προηγούμενων είναι το συμπέρασμα ότι δεν μπορεί αυτή τη στιγμή να διαπιστωθεί σχέση ένα προς ένα στις μελέτες αντιδράσεων των καλλιεργειών.

Το μόνο δυνατόν είναι να επιχειρηθεί μία πρώτη προσέγγιση η οποία θα καταλήξει σε μια πιο στενή σχέση χρησιμοποιώντας μεθόδους συστηματοποίησης. Προτείνονται τρεις μέθοδοι πρώτης προσέγγισης:

- η φαινολογική,
- η μετεωρολογική και
- η φαινομετεωρολογική προσέγγιση.

### 3.2.1 Φαινολογική προσέγγιση

Στη διαδικασία της ανάπτυξης, από το φύτεμα των σπόρων ως το σχηματισμό νέων σπόρων τα φυτά παρουσιάζουν διάφορες ορατές εξωτερικές μεταβολές οι οποίες είναι αποτέλεσμα περιβαλλοντικών συνθηκών. Αυτές οι εξωτερικές μεταβολές καλούνται φαινολογικές φάσεις (στάδια) της ανάπτυξης του φυτού και οι αντίστοιχες παρατηρήσεις ονομάζονται φαινολογικές παρατηρήσεις. Η φαινολογία είναι ο κλάδος της αγρομετεωρολογικής επιστήμης που ασχολείται με τη σχέση καιρού ή κλίματος και των περιοδικών βιολογικών φαινομένων όπως οι φάσεις ανάπτυξης των φυτών.

Οι φυτοφαινολόγοι και οι γεωπόνοι ενδιαφέρονται πολύ για το είδος μελέτης στο οποίο χρησιμοποιούνται διάφορες μαθηματικές και στατιστικές διατυπώσεις στην έρευνα τόσο άγριων όσο και καλλιεργούμενων φυτών. Αυτή η προσέγγιση καθίσταται δυνατή γιατί θεωρείται ότι ένα φυτό ενσωματώνει όλες τις περιβαλλοντικές αλλαγές γύρω του, πέρα από τις εσωτερικές επιδράσεις της γενετικής του σύστασης. Έτσι, δεν απαιτούνται άμεσες

μετρήσεις των περιβαλλοντικών στοιχείων, επομένως, ένας τρόπος προσέγγισης για τον αγρομετεωρολόγο είναι να αφήσει κατά μέρος τους φυσικούς περιβαλλοντικούς παράγοντες, και να ασχοληθεί με τη βιολογική σχέση των γεγονότων.

Η σχέση αυτή θα πρέπει να υπολογιστεί στατιστικά, και να γίνει διάκριση ανάλογα με το μέγεθος της συσχέτισης. Αν υπάρχει ξεκάθαρη σχέση, μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως πρώτη προσέγγιση. Αν δεν ισχύει αυτό, ο ερευνητής μπορεί να βελτιώσει τη σχέση λαμβάνοντας υπόψη τους περιβαλλοντικούς παράγοντες. Γενικά δεν μπορεί να υπάρξει απόλυτη συσχέτιση μεταξύ δύο φαινομένων επομένως, οι αποκλίσεις από την πλήρη συσχέτιση μπορούν να περιορίζονται περαιτέρω από τους περιβαλλοντικούς παράγοντες.

Για παράδειγμα, ο Wang το 1961 μελέτησε σε βάθος την παραγωγή Υ (σε τόνους ανά εκτάριο) και την ποιότητα Q (σύμφωνα με τις ενδείξεις του τρυφερομέτρου-συσκευής μέτρησης ωριμότητας (tenderometer) ή T.R.) των μπιζελιών Early Perfection που καλλιεργούνται στη Janesville του Wisconsin, και το Rochester της Minnesota. Η παραγωγή και η ποιότητα εξετάστηκαν σε σχέση με τα διάφορα στάδια της αύξησης, όπως:

- οι ημέρες που μεσολαβούν μεταξύ της φύτευσης και της ανθοφορίας ( $D_1$ ),
- μεταξύ ανθοφορίας και συγκομιδής ( $D_2$ ),
- και μεταξύ φύτευσης και συγκομιδής ( $D_3$ ).

Ο Wang χρησιμοποίησε 263 δείγματα για τη Janesville και 361 για το Rochester ενώ και για τις δύο τοποθεσίες ερευνήθηκαν πενταετή δεδομένα (1956-1960). Οι στατιστικοί χειρισμοί φαίνονται στο παρακάτω πίνακα

A. Mean and Extreme								
Locality	Mean Number of Days (Extreme range of variation)			Standard Deviation			Mean Y (range) Tons/Acre	Mean Q (range) T. R.
	$D_1$	$D_2$	$D_3$	$D_1$	$D_2$	$D_3$		
Janesville	47 (36-57)	20 (15-28)	67 (56-84)	5	3	6	2.03 (0.66-4.95)	107 (84-164)
Rochester	44 (12-59)	21 (12-29)	65 (33-79)	7	3	7	1.86 (0.30-3.44)	104 (80-147)

Στον πίνακα επίσης αναφέρονται οι συντελεστές συσχέτισης (correlation coefficients) για τη Janesville και το Rochester.

Janesville						Rochester					
	Q	Y	D <sub>1</sub>	D <sub>2</sub>	D <sub>3</sub>		Q	Y	D <sub>1</sub>	D <sub>2</sub>	D <sub>3</sub>
Q	1.00	0.31	0.09	0.09	0.12		1.00	0.29	-0.03	0.51	0.21
Y		1.00	0.14	0.22	0.23			1.00	0.20	0.21	0.31
D <sub>1</sub>			1.00	-0.02	0.88				1.00	-0.29	0.89
D <sub>2</sub>				1.00	0.46					1.00	0.18
D <sub>3</sub>					1.00						1.00



Για την Janesville ο συντελεστής συσχέτισης των Q και Y ισούται με 0,31, και για το Rochester με 0,29. Επομένως, η πιο σημαντική ανάμεσα σε όλες τις δυνατές συσχετίσεις είναι αυτή των D<sub>1</sub> και D<sub>3</sub> και για τις δύο τοποθεσίες. Αν  $r=0,88$ , ή  $r^2=0,77$  για τη Janesville,  $r=0,89$  ή  $r^2=0,79$  για το Rochester, τότε το επίπεδο στατιστικής σημαντικότητας (statistical significance level) και στις δύο περιπτώσεις είναι  $P<0,01$ .

Αυτό σημαίνει ότι υπάρχει στενή σχέση ανάμεσα στον αριθμό των ημερών μεταξύ του χρόνου φύτευσης και του χρόνου ανθοφορίας, D<sub>1</sub>, και τον αριθμό των ημερών μεταξύ του χρόνου φύτευσης και του χρόνου συγκομιδής, D<sub>3</sub>. Διαθέτουν συντελεστή καθορισμού (coefficient of determination) περίπου 0,80 και επίπεδο αξιοπιστίας (confidence level) πάνω από 99%. Η σχέση τους μπορεί να εκφραστεί ως εξής:

$$D_3 = 1,283 D_1 + 6,694 \quad (\text{για τη Janesville}), \quad (3-3)$$

$$D_3 = 1,096 D_1 + 16,646 \quad (\text{για το Rochester}). \quad (3-4)$$

Τα παραπάνω ευρήματα θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν για προβλέψεις αν είναι γνωστό το D<sub>1</sub>.

Όσον αφορά τις μετρήσεις του τρυφερόμετρου και την παραγωγή παρατηρείται ότι η πολλαπλή συσχέτιση του Y με τα Q και D<sub>3</sub> είναι 0,37 και για τις δύο πόλεις.

Αυτές είναι και οι υψηλότερες πολλαπλές συσχετίσεις (multiple correlations) που προκύπτουν από όλους τους δυνατούς συνδυασμούς των διαθέσιμων παραγόντων. Οι αντίστοιχες εξισώσεις παλινδρόμησης (regression equations) είναι:

$$Y = 0,01317Q + 0,01857D_3 - 0,6282 \quad (\text{για τη Janesville}), \quad (3-5)$$

$$Y = 0,00891Q + 0,01974D_3 - 0,3971 \quad (\text{για τη Rochester}). \quad (3-6)$$

Παρόλ' αυτά, για την απλή συσχέτιση των Y και Q ισχύει  $r=0,31$ , ή  $r^2=0,10$  και  $P<0,01$  για τη Janesville. Η εξίσωση παλινδρόμησης είναι

$$Y = 0,1426Q + 0,494 \quad (3-7)$$

Για το Rochester, η πολλαπλή συσχέτιση των Q, D<sub>2</sub> και Y είναι 0,54, με  $r^2=0,29$  και  $P<0,01$ . Η εξίσωση παλινδρόμησης είναι

$$Q = 1,951 D_2 + 4,792Y + 58,89 \quad (3-8)$$

Πάλι για το Rochester, η απλή συσχέτιση μεταξύ Y και Q είναι μικρότερη από την πολλαπλή. Ισχύει  $r=0,29$ , ή  $r^2=0,08$  και  $P<0,01$ . Η εξίσωση παλινδρόμησης είναι

$$Y = 0,1102Q + 0,661 \quad (3-9)$$

Αυτό δεν υπονοεί υποχρεωτικά ότι οι σχέσεις όλων των φαινολογικών φαινομένων του παραδείγματος περιγράφονται από γραμμικές συναρτήσεις. Αυτό μπορεί να οφείλεται στην ύπαρξη ανεπαρκούς συσχέτισης,

ιδίως στην εξίσωση (3-9). Οι ανεπαρκείς συσχετίσεις οφείλονται κυρίως στην παραλλακτικότητα των περιβαλλοντικών παραγόντων. Η απόκλιση των φαινολογικών συμβάντων από τη φυσιολογική τάση μπορεί να συσχετιστεί περαιτέρω με περιβαλλοντικούς παράγοντες.

Για παράδειγμα, στην περίπτωση της Janesville, όπου το  $Y$  παρίσταται σε σχέση με το  $Q$  για κάθε ξεχωριστό έτος, η κάθετη απόσταση του σημείου διασποράς (scattering point) από την ευθεία παλινδρόμησης που περιγράφει η εξίσωση (3-7) μπορεί να επηρεαστεί από τους περιβαλλοντικούς παράγοντες, όπως η μεταβολή της θερμοκρασίας, των βροχοπτώσεων, κτλ.

Επομένως, κάθε συνάρτηση παλινδρόμησης μεταξύ των φαινολογικών συμβάντων, είτε ευθεία είτε καμπύλη, μπορεί να θεωρηθεί ότι είναι η συνήθης (trend) και να χρησιμοποιηθεί ως οδηγός στην περιβαλλοντολογική μελέτη.

### 3.2.2 Μετεωρολογική προσέγγιση

Οι συνθήκες θερμοκρασίας και πόρων μιας περιοχής μπορεί να περιγραφούν χρησιμοποιώντας μόνο στοιχεία θερμοκρασίας αέρα. Μια πλήρης περιγραφή περιλαμβάνει έρευνα των παρακάτω παραμέτρων:

- Μέση θερμοκρασία.
- Ακραίες θερμοκρασίες αέρα.
- Αριθμό ημερών με συγκεκριμένες μέσες ή ακραίες θερμοκρασίες.
- Έναρξη, λήξη και διάρκεια περιόδων πάνω από συγκεκριμένη θερμοκρασία και αθροιστικές θερμοκρασίες (ημερόβαθμοι) συσσωρευμένες κατά τη διάρκεια των περιόδων αυτών.
- Μέσες και ακραίες ημερομηνίες τελευταίου παγετού την άνοιξη και πρώτου παγετού το φθινόπωρο. Διάρκεια της ελεύθερης παγετού περιόδου.
- Ηπειρωτικότητα.

Υπάρχουν επίσης μελέτες που χρησιμοποιούν μετεωρολογικά και γεωργικά στοιχεία. Οι μελέτες αυτές ασχολούνται με την επίδραση της θερμοκρασίας στα ζώα, φυτά, εδάφη, την εμφάνιση εχθρών, ασθενειών και άλλα. Οι ακόλουθες μελέτες μπορεί να γίνουν:

- Θερμοκρασίες όπου εκβλάστηση και φύτρωμα φυτών εμφανίζονται.
- Θερμοκρασίες όπου ο νέος κύκλος ανάπτυξης αρχίζει για εποχικά φυτά.
- Κρίσιμες θερμοκρασίες (ελάχιστες, βέλτιστες, μέγιστες) για διαφορετικές φάσεις ανάπτυξης των φυτών.
- Δυσμενείς θερμοκρασίες (χαμηλές και υψηλές) για διάφορες φάσεις ανάπτυξης των φυτών.
- Αθροιστικές θερμοκρασίες (ημερόβαθμοι) για κάθε περίοδο μεταξύ φάσεων στην ανάπτυξη των φυτών, καθώς και σ' όλη την περίοδο αύξησης.
- Επίδραση θερμοκρασίας στη διάρκεια των περιόδων μεταξύ φάσεων, καθώς και σ' όλη την περίοδο αύξησης.
- Επίδραση θερμοκρασίας στην ποιότητα συγκομιδής.
- Επίδραση θερμοκρασίας στην ποιότητα συγκομιδής.
- Επίδραση θερμοκρασίας στην εμφάνιση ασθενειών.
- Επίδραση θερμοκρασίας στην υγεία οικιακών ζώων.

- Επίδραση θερμοκρασίας στην παραγωγικότητα οικιακών ζώων.
- Επίδραση θερμοκρασίας στη δίαιτα υγρασίας του εδάφους.
- Επίδραση θερμοκρασίας στο ρυθμό εξατμισοδιαπνοής.
- Επίδραση θερμοκρασίας στην αποθήκευση αγροτικών προϊόντων.
- Επίδραση θερμοκρασίας στον αριθμό ευνοϊκών ημερών για εργασίες πεδίου κλπ.

Εδώ δίνεται έμφαση στους φυσικούς παράγοντες, όπως η θερμοκρασία και οι βροχοπτώσεις, αντί για τα φαινολογικά φαινόμενα όπως το φύτρωμα και η ανθοφορία. Πρώτα από όλα, ενδιαφέρει να βρεθούν οι αιτιακές σχέσεις μεταξύ των διαφόρων μετεωρολογικών στοιχείων.

Στη μελέτη της διάδρασης θερμοκρασίας-βροχοπτώσεων απαιτείται η γνώση της ποσοτικής σχέσης μεταξύ των δύο στοιχείων για την ίδια τοποθεσία. Ο αριθμός των θερμών ή ψυχρών περιόδων σε μία εποχή του έτους, όπως φαίνονται από τη θερμοκρασία, σε σχέση με τον αριθμό των ξηρών ή υγρών περιόδων, όπως φαίνονται από τις βροχοπτώσεις κατά τη διάρκεια της ίδιας εποχής, αποτελεί ένα παράδειγμα τέτοιας μελέτης. Η ποσότητα της βροχής για μία βροχερή ημέρα σε σχέση με την ελάχιστη θερμοκρασία της συγκεκριμένης ημέρας αποτελεί ένα ακόμα παράδειγμα. Φυσικά, θα πρέπει να προσδιοριστεί π.χ. η ένταση, η διάρκεια, η ποσότητα και το είδος της βροχής, και το αντίστοιχο για τη θερμοκρασία.

Επίσης, θα πρέπει να προσδιοριστούν οι κινήσεις των μετώπων (π.χ. ψυχρό ή θερμό μέτωπο), η διεύθυνση και η ταχύτητα του ανέμου, η νέφωση του συνοπτικού περιβάλλοντος κτλ., έτσι ώστε να διαπιστωθεί μία λογική φυσική σχέση μεταξύ των περιβαλλοντικών παραγόντων. Αυτός ο τύπος καθαρά φυσικής προσέγγισης μπορεί να αφορά ένα ζεύγος απλών παραγόντων, όπως η ταχύτητα του ανέμου σε σχέση με τη συχνότητα εμφάνισης των μέγιστων θερμοκρασιών, ή μία ομάδα στοιχείων σε σχέση με μία άλλη ομάδα, π.χ. φωτοθερμική μονάδα (photothermal unit) σε σχέση με τη μονάδα βαθμού ενέργειας (energy degree unit).

Οι περιβαλλοντικοί παράγοντες εμπίπτουν σε τρεις βασικές κατηγορίες: φωτοκλιματικές, θερμοκλιματικές και υδροκλιματικές μονάδες. Ο καθορισμός αυτών των τριών μονάδων επιτρέπει πρωτίστως τη μελέτη των σχέσεων καλλιέργειας-περιβάλλοντος σε μία μεγάλη γεωγραφική έκταση, κάτι που χρησιμεύει στις μελέτες των αντιδράσεων των φυτών. Για παράδειγμα, η φωτοθερμική μονάδα (**P.T.U.**) αποτελεί μία από τις εκφράσεις της φωτοκλιματικής μονάδας.

Ο Nuttonson (1955) εκπόνησε μία συγκριτική μελέτη της αθροιστικής συνάρτησης βαθμού-ημέρας δηλαδή του συστήματος υπολοίπων (remainder system) και των απαιτήσεων σε φωτοθερμικές μονάδες ποικιλιών σιταριού που καλλιεργούνται σε διάφορα μέρη της Β. Αμερικής και σε κάποιες περιοχές της ΕΣΣΔ και της Φιλανδίας με ανάλογες κλιματικές και θερμικές συνθήκες. Η μέθοδος των αγροκλιματικών αναλογιών που χρησιμοποίησε, επιχειρεί να αποκαλύψει τις θερμικές και φωτοθερμικές απαιτήσεις τόσο του χειμερινού όσο και του εαρινού σιταριού που καλλιεργούνται σε συνθήκες αγρού. Επίσης παρέχει ένα μέτρο ταξινόμησης των ποικιλιών σιταριού με φυσιολογικά-θερμικά κριτήρια και κριτήρια για την πρόβλεψη του χρόνου βλάστησης και ωρίμανσης του σιταριού.

Σύστησε τους 40°F ως κατάλληλη βοηθητική τιμή για την άθροιση των θερμοκρασιών που επικρατούν σε διάφορα φαινολογικά στάδια, όπως μεταξύ οργώματος και βλάστησης, φυτρώματος και βλάστησης, βλάστησης

και ωρίμανσης, και από σταθμό σε σταθμό σε μεγάλη γεωγραφική έκταση. Τα στατιστικά αποτελέσματα υποδεικνύουν ότι η τιμή των 40°F, σε σχέση με οποιαδήποτε άλλη τιμή, δίνουν τον μικρότερο συντελεστή παραλλακτικότητας για τις μέσες θερμικές απαιτήσεις του σιταριού από έτος σε έτος. Ο Nuttonson διαπίστωσε ότι το άθροισμα βαθμού-ημερών για την ίδια ποικιλία σιταριού ποικίλλει ανάλογα με το γεωγραφικό πλάτος, το υψόμετρο και τις βροχοπτώσεις. Έτσι:

(i) σε περιοχές με παρεμφερές υψόμετρο, η αύξηση του γεωγραφικού πλάτους προκαλεί μείωση στο άθροισμα βαθμού - ημερών

(ii) σε περιοχές με μικρή διαφορά στο πλάτος, η αύξηση στο υψόμετρο έχει ως αποτέλεσμα μείωση στο άθροισμα βαθμού - ημερών

(iii) σε περιοχές με παρόμοιες θερμοκρασίες, γεωγραφικό πλάτος και υψόμετρο, οι συνθήκες επαρκέστερης υγρασίας του εδάφους φαίνεται να σχετίζονται με μία αύξηση στο άθροισμα βαθμού - ημερών.

Ωστόσο, όπως συμπέρανε ο Nuttonson, και στις τρεις παραπάνω περιπτώσεις, η διαφορά μειώνεται σημαντικά όταν χρησιμοποιείται το άθροισμα των φωτοθερμικών μονάδων. Αυτό δείχνει ότι η φωτοθερμική μονάδα αποτελεί προτιμότερη παράμετρο όταν πρόκειται για μελέτη μεγάλης γεωγραφικής έκτασης. Το παραπάνω αποκαλύπτει, όχι μόνο τις θερμικές επιδράσεις, αλλά και τις φωτοπεριοδικές αντιδράσεις των καλλιεργειών.

Το γινόμενο θερμοκρασίας και μήκους ημέρας διαμορφώθηκε ήδη από το 1852 από τον Fritsch, ο οποίος υπολόγισε το θερμικό ποσό περίπου 889 ειδών φυτών, από το στάδιο της ανθοφορίας μέχρι την ωρίμανση. Ο Smith (1960) υπολόγισε τον «βαθμό ωρών ηλιοφάνειας» πολλαπλασιάζοντας τη μέση ευνοϊκή θερμοκρασία με τις συνολικές δυνατές ώρες ηλιοφάνειας από την φύτευση μέχρι τη συγκομιδή.

Μια άλλη φωτοκλιματική μονάδα είναι το γινόμενο της ευνοϊκής θερμοκρασίας επί την ηλιακή ένταση, που μπορεί να ονομαστεί μονάδα «ενέργειας-βαθμού» (energy-degree unit) ή E.D.U. Μαθηματικά, ορίζεται ως εξής:

$$E.D.U. = \sum_{i=p_1}^{p_2} (T - T_c) E \quad (3-10)$$

όπου το  $p_1$  αντιστοιχεί στην πρώτη φάση, το  $p_2$  στη φάση που ακολουθεί, το  $T$  στη μέση ημερήσια θερμοκρασία, το  $T_c$  στην κρίσιμη τιμή της θερμοκρασίας για το συγκεκριμένο είδους φυτού και  $E$  η ημερήσια συσσώρευση ηλιακής ακτινοβολίας σε  $1y$  ανά ημέρα.

Στον υπολογισμό της μονάδας ενέργειας-βαθμού θα πρέπει να σημειωθούν οι επιλογές θερμοκρασίας (όπως ο ημερήσιος μέσος, η ημερήσια μέγιστη τιμή ή η ωριαία θερμοκρασία σε συγκεκριμένο χρόνο), καθώς και οι επιλογές μιας συγκεκριμένης ανώτατης και κατώτατης ακραίας τιμής για την ηλιακή ένταση. Μία συννεφιασμένη ημέρα του χειμώνα η ένταση του φωτός μπορεί να είναι πολύ χαμηλή για να κατορθώσει ένα συγκεκριμένο φυτό να αναπτυχθεί στο θερμοκήπιο. Μία ηλιόλουστη καλοκαιρινή ημέρα μπορεί η ένταση του φωτός να είναι πολύ μεγάλη και να πυροδοτεί διαδικασίες φωτοοξειδωσης. Σε καμιά από τις δύο αυτές περιπτώσεις δεν θα ήταν δυνατή η χρήση της εξίσωσης (3-10)· επομένως θα πρέπει πάντα να περιγράφονται πλήρως οι συνθήκες.



Η θερμοκλιματική μονάδα μπορεί να εκφραστεί με διάφορους τρόπους, που στην πλειονότητά τους συνίστανται στην άθροιση της θερμότητας με τη θερμοκρασία του αέρα ως μοναδικό κλιματικό στοιχείο. Ο Seeley (1917) επεσήμανε τα μειονεκτήματα της άθροισης της θερμότητας εξαιτίας της ύπαρξης μεγάλων διαφορών στον υπολογισμό των ευνοϊκών θερμοκρασιών από έτος σε έτος και πρότεινε τη χρήση της θερμοκρασίας του φυτού αντί για τη θερμοκρασία του αέρα. Μετά από εκτεταμένη παρατήρηση, συμπέρανε ότι, όταν ο καιρός είναι αίθριος και επικρατεί άπνοια, η θερμοκρασία των φύλλων που είναι εκτεθειμένα στον ήλιο μπορεί να είναι μέχρι και 20°F υψηλότερη από αυτή των φύλλων που βρίσκονται υπό σκιά. Επίσης, τα φύλλα είναι συνήθως ψυχρότερα από τον αέρα τη νύχτα (ειδικά νωρίς το βράδυ) και νωρίς το πρωί.

Σύμφωνα με τον Seeley, η επίδραση της νέφωσης στην θερμοκρασία του φυτού είναι σημαντική. Βρήκε ότι, κατά μέσο όρο, η θερμοκρασία του φυτού το μεσημέρι ήταν κατά 15,2°F μεγαλύτερη σε συνθήκες πλήρους ηλιοφάνειας, κατά 9,7°F μεγαλύτερη σε συνθήκες μερικής ηλιοφάνειας και λιγότερο από 1°F σε ημέρες με συννεφιά. Στηριζόμενος σε αυτές τις μέσες τιμές, όρισε την ευνοϊκή θερμοκρασία ως:

$$T_E = t + 15D_C + 10 D_P, \quad (3-11)$$

όπου  $T_E$  το άθροισμα των ευνοϊκών θερμοκρασιών·  $t = T_M - 42n$  ( $T_M$  είναι το άθροισμα όλων των μέγιστων θερμοκρασιών για  $n$  ημέρες)·  $D_C$  είναι ο αριθμός αίθριων ημερών· και  $D_P$ , ο αριθμός των ημερών με μερική νέφωση.

Ο Wang (1958) βρήκε ότι οι ημερήσιες, διημερήσιες και εποχιακές αλλαγές στη θερμοκρασία είναι σημαντικές για τις μελέτες των αντιδράσεων των φυτών. Χρησιμοποίησε το άθροισμα αυτών των θερμοκρασιών σε διάφορα στάδια της ανάπτυξης ως σημαντική παράμετρο. Το ημερήσιο εύρος της θερμοκρασίας είναι η διαφορά μεταξύ της ελάχιστης και της μέγιστης θερμοκρασίας για μία συγκεκριμένη ημέρα. Αν αυτή η διαφορά διαιρεθεί με το χρονικό διάστημα μεταξύ της εμφάνισης της ελάχιστης και της μέγιστης θερμοκρασίας, λαμβάνεται ο μέσος ρυθμός θέρμανσης.

Η διημερήσια θερμοκρασία, που πρόκειται για τη διαφορά μεταξύ της μέγιστης θερμοκρασίας μιας ημέρας και της ελάχιστης της επόμενης, συνήθως περιγράφει τη διαδικασία ψύξης. Πάλι, όταν αυτή η διαφορά διαιρεθεί δια του χρόνου που μεσολάβησε μεταξύ των δύο μετρήσεων, λαμβάνεται ο μέσος ρυθμός ψύξης.

Η διάρκεια της διημερήσιας θερμοκρασίας εξαρτάται από συγκεκριμένους παράγοντες, τις διαφορές στο γεωγραφικό πλάτος, τις εποχιακές και συνοπτικές διαφορές. Η τιμή της εξαρτάται από τη νέφωση και επομένως από την ηλιακή ακτινοβολία, εκτός αν παρεμβληθούν απότομες αλλαγές της συνοπτικής κατάστασης. Στην περίπτωση μιας αίθριας ημέρας και μιας αίθριας νύχτας, το μεγαλύτερο μέρος της ακτινοβολούσας ενέργειας κατά τη διάρκεια της ημέρας εμφανίζεται ως αισθητή θερμότητα (Θερμότητα που χρειάζεται για να προκληθεί αλλαγή θερμοκρασίας, αλλά όχι αλλαγή φάσης) όταν το έδαφος είναι ξηρό, προκαλώντας άνοδο της θερμοκρασίας και υψηλό ημερήσιο μέγιστο. Το μεγαλύτερο μέρος της θερμότητας διαφεύγει τη νύχτα με τη διαδικασία της ακτινοβολίας μακρού κύματος με αποτέλεσμα να υπάρχει τελικά ένα χαμηλό ημερήσιο ελάχιστο.

Επομένως, με ξηρό έδαφος, ο συνδυασμός αίθριας ημέρας και αίθριας νύχτας δημιουργεί υψηλή διημερήσια θερμοκρασία. Όταν το έδαφος είναι υγρό, μεγάλο μέρος της ενέργειας που απορροφάται κατά τη διάρκεια της ημέρας αποθηκεύεται ως λανθάνουσα θερμότητα. Στην περίπτωση αυτή η διημερήσια θερμοκρασία αναμένεται να είναι μικρότερη. Μικρή διημερήσια θερμοκρασία αναμένεται επίσης όταν ο ουρανός είναι νεφελώδης τόσο την ημέρα όσο και τη νύχτα, εξαιτίας του μικρού ποσού ακτινοβόλου ενέργειας που εισέρχεται κατά τη διάρκεια της ημέρας, και του εξίσου μικρού ποσού ακτινοβολίας που διαφεύγει κατά τη διάρκεια της νύχτας.

Σύμφωνα με τα παραπάνω, υφίσταται γραμμική συσχέτιση μεταξύ της μέσης διημερήσιας θερμοκρασίας για πέντε ημέρες. Εξαιτίας της χρονικής υστέρησης δεν αποκαλύπτεται η σχέση αυτών των παραγόντων από ημέρα σε ημέρα. Ουσιαστικά, ο συνδυασμός της διημερήσιας θερμοκρασίας με την υγρασία του εδάφους θα αποτελούσε προτιμότερη παράμετρο.

Αριθμητικά, δεν υπάρχει διαφορά μεταξύ του αθροίσματος της διημερήσιας θερμοκρασίας και του ημερησίου εύρους θερμοκρασίας για έναν πλήρη κύκλο αλλαγής της θερμοκρασίας, π.χ. για ένα έτος. Ωστόσο αυτό δεν ισχύει αν κατά τη διάρκεια της εποχής της αύξησης του φυτού επικρατεί κάποιο συγκεκριμένο διάστημα. Αν υπάρχει ψυχρό διάστημα, το άθροισμα της διημερήσιας θερμοκρασίας είναι μεγαλύτερο από αυτό του ημερησίου, ενώ το αντίστροφο ισχύει για ένα ψυχρό διάστημα. Η μαθηματική διατύπωση της μέσης διημερήσιας θερμοκρασίας είναι:

$$\bar{T}_1 = 1/X - 1 \sum_{i=1}^n (T_{Mi} - T_{mi} - 1) \quad (3-12)$$

όπου  $\bar{T}_1$  είναι η μέση διαφορά στην διημερήσια θερμοκρασία για την κρίσιμη περίοδο των  $n$  ημερών,  $i$  είναι η ημερομηνία (σύμφωνα με το ημερολογιακό έτος)  $T_M$  η ημερήσια μέγιστη θερμοκρασία και  $T_m$  η ημερήσια ελάχιστη θερμοκρασία σε βαθμούς Fahrenheit. Επομένως, το  $T_1$  υπολογίζεται σε  $^{\circ}\text{F}$  ανά ημέρα.

Η εποχιακή διαφορά της θερμοκρασίας  $\bar{T}_D$  ορίστηκε από τον Wang (1962<sup>a</sup>) ως η θερμοκρασία του χρόνου συγκομιδής ( $\bar{T}_H$ ) μείον τη θερμοκρασία του χρόνου φύτευσης ( $\bar{T}_P$ ), δηλαδή,

$$\bar{T}_D = \bar{T}_H - \bar{T}_P, \quad (3-13)$$

όπου  $\bar{T}_D$  η μέση εποχική διαφορά θερμοκρασίας,  $\bar{T}_H$  η μέση ελάχιστη θερμοκρασία κατά τη συγκομιδή και  $\bar{T}_P$  η μέση ελάχιστη θερμοκρασία κατά τη φύτευση. Έχει βρεθεί ότι η ελάχιστη θερμοκρασία δίνει σωστότερα αποτελέσματα σε σχέση με οποιαδήποτε άλλη έκφραση της θερμοκρασίας.

Για ένα τυπικό διημερήσιο κύκλο, η διάρκεια της ελάχιστης θερμοκρασίας είναι μεγαλύτερη από αυτή της μέγιστης. Επίσης, η ελάχιστη θερμότητα μπορεί να αποτελέσει τον περιοριστικό παράγοντα όσον αφορά τις θερμοκρασιακές απαιτήσεις των μπιζελιών. Εφόσον τα μπιζέλια είναι θερμοευαίσθητα φυτά ο συνδυασμός θερμής άνοιξης και ψυχρού καλοκαιριού δίνει μεγαλύτερη παραγωγή και καλύτερη ποιότητα, από ότι ο συνδυασμός

ψυχρής άνοιξης και θερμού καλοκαιριού. Στην πρώτη περίπτωση είναι υψηλή η τιμή για την  $T_D$ . Αυτό φαίνεται σε διάγραμμα όπου η  $T_D$  παρίσταται σε σχέση με την παραγωγή και όπου διαπιστώνεται ότι υπάρχει αρνητική συσχέτιση.

Το σχήμα 3.1 δείχνει την παραγωγή των ποικιλιών Early Perfection 3040 και New Line Early Perfection (σε λίβρες/εκτάριο) σε σχέση με την τιμή της  $T_D$  (σε βαθμούς Fahrenheit) για τη Janesville του Wisconsin. Ο συντελεστής συσχέτισης ή  $r$  ισούται με  $-0,80$ , ενώ το  $r^2$  είναι  $0,64$  και  $P < 0,01$ .

Η εξίσωση παλινδρόμησης είναι

$$y = -313,8 (T_D) + 10819, \quad (3-14)$$

όπου  $y$  είναι η παραγωγή σε λίβρες/εκτάριο και  $T_D$  η εποχική διαφορά σε βαθμούς Fahrenheit. Στην έρευνα αυτή χρησιμοποιήθηκε ως  $T_P$  η μέση ελάχιστη ημερήσια θερμοκρασία 20 ημερών μετά την φύτευση και ως  $T_H$  η μέση ελάχιστη ημερήσια θερμοκρασία 20 ημερών πριν τη συγκομιδή.

Το υδροκλιματικό σύστημα, που αποτελεί μια άλλη κατηγορία κλιματικών μονάδων, έχει χρησιμοποιηθεί πολύ τα τελευταία πενήντα χρόνια. Ο Meyer εισήγαγε το έλλειμμα Βροχόπτωσης-Κορεσμού (Precipitation-Saturation deficit) ή απλά πηλίκιο N-S το οποίο αποτελεί συνδυασμό του ύψους της βροχής  $P$  και του ελλείμματος της πίεσης των ατμών  $e_s - e$ . Αυτή η εξίσωση έχει υιοθετηθεί για την μελέτη του κλίματος ως παράγοντα σχηματισμού του εδάφους. Η εξίσωση του Penman για τον υπολογισμό της δυνητικής εξατμισοδιαπνοής περιέχει τέσσερα στοιχεία: την θερμοκρασία, την ταχύτητα του ανέμου, την σχετική υγρασία και τις ώρες ηλιοφάνειας. Αυτοί είναι οι παράγοντες που ελέγχουν την εξάτμιση.

Ο Smith διατύπωσε ως εξής των δείκτη του Livingston για την επάρκεια υγρασίας-θερμοκρασίας για την ανάπτυξη του φυτού:

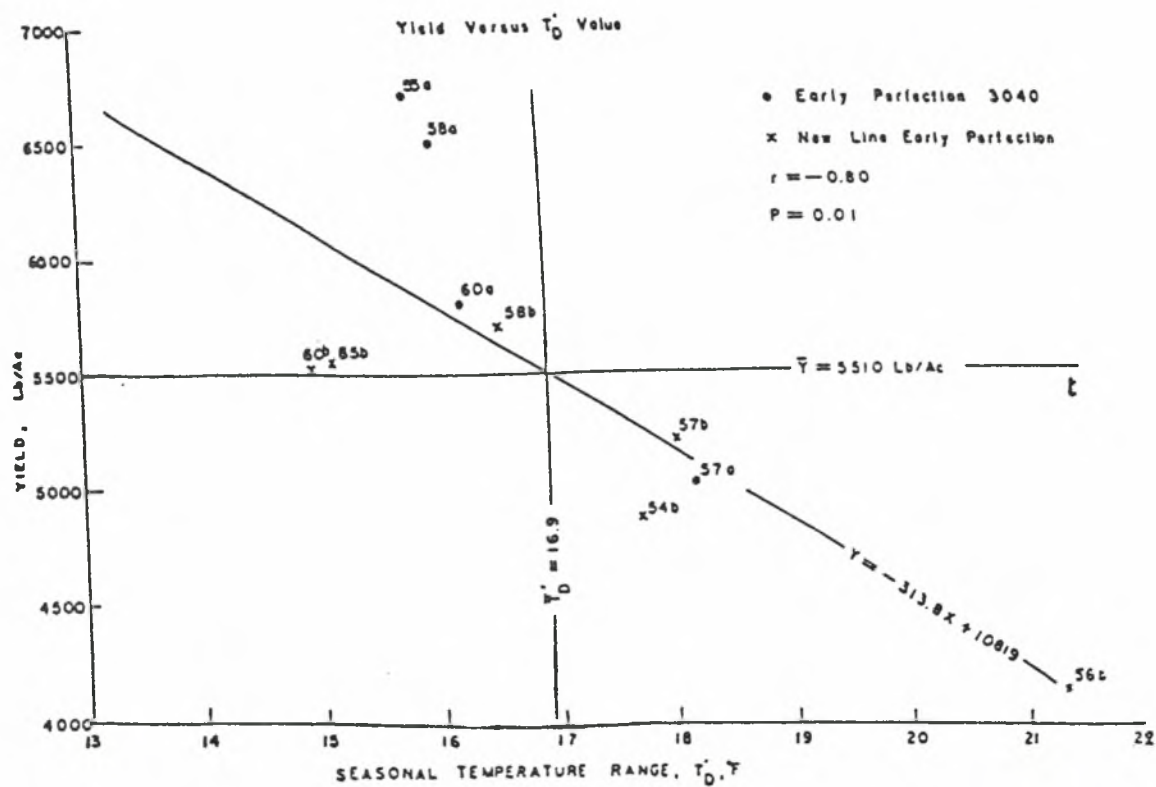
$$I_{mt} = I_t - I_p / I_e \quad (3-15)$$

όπου  $I_{mt}$  ο δείκτης επάρκειας υγρασίας και θερμοκρασίας,  $I_t$  ο δείκτης επάρκειας της θερμοκρασίας ο οποίος προκύπτει από το φυσιολογικό άθροισμα  $I_p$  ο δείκτης της βροχόπτωσης (που αντιστοιχεί στο συνολικό ύψος της βροχής για την μελετούμενη περίοδο) και  $I_e$  ο δείκτης της εξάτμισης, που αναφέρεται στην συνολική εξάτμιση για την συγκεκριμένη περίοδο.

Ο Kincer (1915) ερεύννησε την μηνιαία απόκλιση της βροχόπτωσης και της θερμοκρασίας σε σχέση με την παραγωγή βαμβακιού στο Τέξας μεταξύ 1894-1913, και διατύπωσε μια εξίσωση, που είναι γνωστή ως «εξίσωση καιρού-βαμβακιού» (weather-cotton equation). Υπέθεσε ότι η απόκλιση της παραγωγής  $Y_d$  είναι συνάρτηση των αποκλίσεων από το κανονικό της βροχόπτωσης και της θερμοκρασίας, δηλαδή των  $p'$  και  $T'$ , αντιστοίχως. Επομένως, η εμπειρική διατύπωση των συσσωρευμένων επιδράσεων είναι:

$$Y_d = Y' - \frac{(cP' + cT')_1 + (cP' + cT')_2 + \dots + (cP' + cT')_n}{N}$$

$$\text{ή} \quad Y' = \frac{\sum (cP' + cT')}{N} \quad (3-16)$$



**Σχήμα 3.1** Καλλιέργεια ποικιλιών Early Perfection και New Line Early Perfection στην Janesville του Wisconsin.



όπου  $Y'$  (σταθερά, 100 σύμφωνα με τα δεδομένα του Kincer) αντιστοιχεί στον αριθμό των βαθμών που αντιστοιχούν στη μέση παραγωγή βαμβακιού και οι οποίοι υπολογίζονται από την απόκλιση της βροχόπτωσης και της θερμοκρασίας. Πρόκειται για παράγοντα ο οποίος ρυθμίζεται έτσι ώστε να επιτρέψει τη συμπλήρωση της εξίσωσης. Τα  $c$  και  $c_1$  είναι οι σχετικοί συντελεστές στάθμισης που αντιστοιχούν στην  $P'$  (απόκλιση της μηνιαίας μέσης τιμής θερμοκρασίας) αντιστοίχως.  $N$  είναι ο συνολικός αριθμός των μηνών, ενώ οι αριθμητικοί δείκτες στο τέλος των παρενθέσεων είναι η σειρά των μηνών στην εποχή της αύξησης, όπως Απρίλιος, Μάιος, Ιούνιος, κτλ.

Ο Thornthwaite (1931, 1948) έχει διατυπώσει τους γνωστούς λόγους «αποτελεσματικότητας της βροχόπτωσης» και «θερμικής αποδοτικότητας» για την ταξινόμηση του κλίματος σύμφωνα με τις σχέσεις φυτών, εδάφους και κλίματος. Ουσιαστικά, η δουλειά του αποτελεί συγχώνευση και αναθεώρηση περισσότερων δεικτών αποτελεσματικότητας της βροχόπτωσης, οι οποίοι είχαν διατυπωθεί από άλλους ερευνητές. Στην διατύπωση του το 1931, οι εξισώσεις που περιγράφουν τον «λόγο αποτελεσματικότητας της βροχόπτωσης» ή λόγο P-E, και τον «λόγο θερμικής αποδοτικότητας» έχουν ως εξής:

$$P-E \text{ ratio} = 115 [P/T-10]^{10/9} \quad (3-17)$$

$$T-E \text{ ratio} = T-32/4 \quad (3-18)$$

όπου τα  $P$  και  $E$  μετρούνται σε ίντσες και η  $T$  σε βαθμούς Fahrenheit. Αρκετοί ερευνητές που ασχολούνται με την έρευνα των δεικτών υποθέτουν ότι η εξάτμιση και η διαπνοή τείνουν να αυξηθούν όταν αυξάνει η θερμοκρασία. Ο Transeau (1905) εισήγαγε έναν δείκτη της βροχόπτωσης όπου

$$I = P/TE, \quad (3-19)$$

όπου  $P$  είναι το ετήσιο ύψος της βροχής σε ίντσες και  $E$  η ετήσια εξάτμιση σε ίντσες. Το 1920, ο Lang ερευνήσε συστηματικά την διάβρωση και τον σχηματισμό του εδάφους με τον τύπο

$$I = P/T, \quad (3-20)$$

όπου  $P$  είναι πάλι το ετήσιο ύψος της βροχής, αλλά τώρα σε χιλιοστά, και  $T$  η μέση ετήσια θερμοκρασία σε βαθμούς Κελσίου. Η διατύπωση του είναι γνωστή ως «παράγοντας βροχής του Lang». Αυτός ο παράγοντας τροποποιήθηκε αργότερα από τον De Martonne (1926) με την προσθήκη της σταθερά 10 στον παρονομαστή. Ο τροποποιημένος δείκτης είναι γνωστός ως «δείκτης ξηρασίας του Martonne».

$$I = P/T-10 \quad (3-21)$$

Κατά τον ίδιο τρόπο ο Köppen το 1918, το 1923 και το 1928 παρουσίασε τρεις τύπους για τον καθορισμό των ξηρών κλιμάτων:

$$I=8P/(5T+120), I=2P/T+33, I=P/T-7 \quad (3-22)$$

Στην ουσία, ο De Martonne επηρεάστηκε σε κάποιο βαθμό από την προηγούμενη δουλειά του Köppen. Το 1936 ο Ångström πρότεινε μια τροποποιημένη έκφραση του Δείκτη Ξηρασίας του De Martonne, τον Συντελεστή Υγρασίας του Ångström

$$I = P/1,07^t \quad (3-23)$$

όπου  $P$  είναι το ύψος της βροχής σε χιλιοστά, και  $t$  η θερμοκρασία σε βαθμούς Κελσίου. Ο Setzer (1946) δημοσίευσε χάρτη του δείκτη υγρασίας για την πολιτεία του Sao Paulo στην Βραζιλία, που παρουσιάζει πολλές ομοιότητες με τον χάρτη της Βορειοδυτικής Ευρώπης του Ångström, αν και οι δύο ερευνητές εργάστηκαν ανεξάρτητα ο ένας από τον άλλο. Η ομοιότητα της εξίσωσης του Setzer με την εξίσωση (3-23) οφείλεται στην χρησιμοποίηση του νόμου του Van't Hoff για την δημιουργία δεικτών. Ο Thornthwaite (1948) ανέπτυξε στην συνέχεια τύπους καθορισμού της μηνιαίας δυνητικής εξατμισοδιαπνοής.

$$e = ct^a \quad (3-24)$$

όπου  $e$  είναι η μηνιαία εξατμισοδιαπνοή σε cm,  $t$  η μέση μηνιαία θερμοκρασία σε βαθμούς Κελσίου, και  $a$  και  $c$  σταθερές που διαφέρουν από τόπο σε τόπο και καθορίζονται από τον τύπο

$$a = 0,000000675 I^3 - 0,0000771 I^2 + 0,01792 I + 0,49239 \quad \text{εδώ:}$$

$$I = \sum_{i=1}^{12} (t / 5) \quad 1,514 \quad \text{και} \quad c = 1/I$$

Από τις σχέσεις αυτές διαμορφώνεται μια γενική εξίσωση της δυνητικής εξατμισοδιαπνοής

$$e = 1,6(10t/I)^a \quad (3-25)$$

Οι εξισώσεις (3-10) έως (3-25) αποτελούν κάποια μόνο παραδείγματα των εμπειρικών διατυπώσεων που υπάρχουν. Στην καλύτερη περίπτωση, μπορούν να χρησιμεύσουν ως πρώτες προσεγγίσεις για συγκεκριμένο αγρομετεωρολογικό σκοπό είτε σε συγκεκριμένη τοποθεσία είτε σε ευρύτερη γεωγραφική έκταση. Ορισμένες φορές, είναι χρήσιμες μόνο για συγκεκριμένα δεδομένα. Επομένως, δεν είναι απαραίτητο να είναι γνωστές όλες οι υπάρχουσες διατυπώσεις, ούτε να εξετάζονται για να εξακριβωθούν κατά πόσο είναι κατάλληλες για το συγκεκριμένο μας πρόβλημα.

Με λίγα λόγια μία απλή συλλογή πληροφοριών δεν χρησιμεύει καθόλου στην επιλογή διατυπώσεις, αλλά η διαπίστωση μιας γενικής εξίσωσης που θα βασίζεται σε θεμελιώδεις αρχές είναι κεφαλαιώδους σημασίας. Επίσης, απαιτείται εξέταση των διαδράσεων μεταξύ των φωτοκλιματικών, θερμοκλιματικών και υδροκλιματικών μονάδων.

### 3.2.3 Φαινομετεωρολογική προσέγγιση

Τα βιοτικά και περιβαλλοντικά στοιχεία παρουσιάστηκαν μέχρι τώρα ξεχωριστά αλλά θα πρέπει να εξεταστούν μαζί, για να διαπιστωθεί αν υπάρχουν λειτουργικές σχέσεις μεταξύ τους. Αυτού του είδους η διαδικασία συνίσταται για τις μελλοντικές έρευνες. Σε αυτή την ενότητα εξετάζεται η προσέγγιση ενός και μόνο στοιχείου για τη μελέτη των φυσικών στοιχείων σε σχέση με τις βιολογικές αντιδράσεις. Αυτό μπορεί να ονομαστεί «φαινομετεωρολογική προσέγγιση» και χρησιμεύει ως μέθοδος πρώτης προσέγγισης στις μελέτες αντιδράσεων των καλλιεργειών.

Πρώτα από όλα θα πρέπει να οριστεί το μοντέλο αντιδράσεων των καλλιεργειών σε ένα μόνο στοιχείο, όπως π.χ. η θερμική αντίδραση της καλλιέργειας. Αυτό εκπληρώνει τους εξής στόχους

(α) επιτρέπει την απόκτηση μιας ολικής εικόνας των αντιδράσεων της καλλιέργειας σε συγκεκριμένο στοιχείο,

(β) μας επιτρέπει να δούμε την επίδραση του συγκεκριμένου στοιχείου σε σχέση με την ηλικία του φυτού,

(γ) επιτρέπει την εφαρμογή των μετρήσεων του θερμοκηπίου στον φυσικό αγρό. Χρησιμοποιείται ως παράδειγμα η θερμική αντίδραση ενός μοντέλου καλλιέργειας για τις ντομάτες και το καλαμπόκι sweet corn.

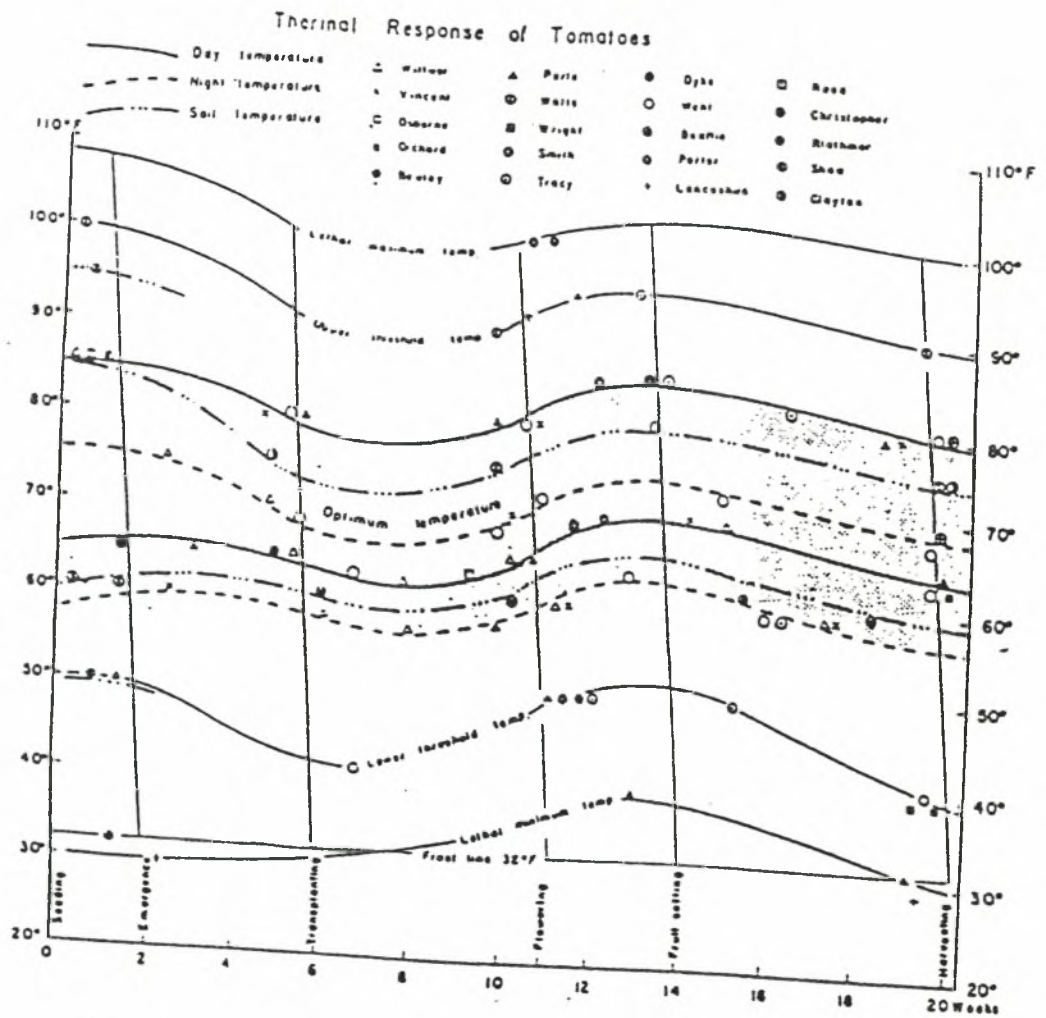
Όπως φαίνεται στο σχήμα 3-2, ο Wang κατασκεύασε ένα μοντέλο της θερμικής αντίδρασης της ντομάτας βασιζόμενος στα πειραματικά ευρήματα διαφόρων ερευνητών. Τα πειράματα ήταν διαφόρων ειδών: στο περιβάλλον, όπως δοκιμές στον αγρό και σε θερμοκήπιο, καθώς και σε phytotron.

Αυτό σήμαινε διαφοροποίηση στον τύπο του εδάφους, στις παραδοσιακές τεχνικές καλλιέργειας, στα είδη της καλλιέργειας τις ποικιλίες και τους τύπους ή ακόμη και στον τύπο των συσκευών μέτρησης θερμοκρασίας. Για να απαλειφθούν οι διαφοροποιήσεις αυτές σχεδιάστηκαν ομαλές καμπύλες θερμικής αντίδρασης. Αυτές οι καμπύλες αντιπροσωπεύουν τις ελάχιστες και μέγιστες θανατηφόρες θερμοκρασίες, τις υψηλότερες και κατώτερες ευνοϊκές θερμοκρασίες και το εύρος της άριστης θερμοκρασίας.

Ως δείκτες των θερμικών απαιτήσεων της ντομάτας χρησιμοποιούνται τρεις θερμοκρασίες:

- Η ημερήσια μέση θερμοκρασία
- Η νυχτερινή θερμοκρασία
- Η θερμοκρασία του εδάφους

Αυτές οι θερμοκρασίες αποτελούν σημαντικά στοιχεία, με την προϋπόθεση ότι έχει γίνει σωστή επιλογή της κρίσιμης περιόδου. Η κλίμακα της θερμοκρασίας, δηλαδή η τετμημένη εκτείνεται από τους 20° F ως τους 110° F. Ωστόσο οι κρίσιμες θερμοκρασίες που αναφέρουν διάφοροι ερευνητές τοποθετούνται μεταξύ 30° F και 100° F. Η τεταγμένη παριστά το χρόνο από 0 ως 20 εβδομάδες μεταξύ σποράς και συγκομιδής αντιστοίχως. Οι δύο πρώτες εβδομάδες μετά την σπορά χαρακτηρίζονται ως περίοδος φυτρώματος, η 6<sup>η</sup> εβδομάδα αποτελεί το χρόνο μεταφύτευσης, η 11<sup>η</sup> τον χρόνο ανθοφορίας και η 14<sup>η</sup> τον χρόνο ωρίμανσης των καρπών. Η κατάταξη απεικονίζει μια μέση κατάσταση που αντικατοπτρίζει τα πιο συχνά ενδεχόμενα. Οι χρονικές περίοδοι και οι ημερομηνίες των ενδεχομένων είναι εναλλάξιμες.



Σχήμα 3.2 Θερμική αντίδραση της ντομάτας



Όσο αφορά στις συγκεκριμένες κάθε φορά ημερομηνίες, αυτές ποικίλουν ανάλογα με την γεωγραφική κατανομή και την εποχική διαφοροποίηση. Επίσης ποικίλουν ανάλογα με την περίπτωση όπως η ντομάτα η οποία απαιτεί σχετικά μεγάλη εποχή για να αποδώσει πλούσια σοδειά καλής ποιότητας επειδή είναι φυτό θερμού καιρού. Επίσης είναι γενικά αποδεκτό ότι οι ντομάτες είναι τρυφερές και δεν αντέχουν θερμοκρασίες παγετού. Αυτό σημαίνει ότι η ελάχιστη θανατηφόρα θερμοκρασία είναι υψηλότερη από τους 32°F. Ωστόσο αυτό δεν ισχύει πάντα σύμφωνα με το μοντέλο.

Όπως φαίνεται στο σχήμα 3.2, ζημίες από τον παγετό δεν υπάρχουν στους 32°F αλλά στους 30°F για την περίοδο πριν την μεταφύτευση και τον καιρό της συγκομιδής. Ωστόσο υπάρχουν ζημίες στους 38°F μεταξύ ανθοφορίας και ωρίμανσης των καρπών. Η κατώτερη ευνοϊκή θερμοκρασία έχει τις ίδιες περίπου διακυμάνσεις με την ελάχιστη θανατηφόρα θερμοκρασία. Η περιοχή μεταξύ της ανωτάτης και της κατώτατης άριστης θερμοκρασίας έχει λιγότερες διακυμάνσεις όσο περνά ο καιρός από την κατώτερη ευνοϊκή θερμοκρασία.

Ανάλογες τάσεις παρουσιάζουν η υψηλότερη ευνοϊκή και η μέγιστη θανατηφόρα θερμοκρασία αν και ορισμένοι ερευνητές δεν συμφωνούν με αυτή την διάκριση ευνοϊκών και θανατηφόρων θερμοκρασιών

Ανάλογο μοντέλο για το καλαμπόκι έχουν παρουσιάσει οι Wang και Nakamura (1960) όπως φαίνεται στο σχήμα 3.3. Χρίζει προσοχής το μικρό εύρος της άριστης θερμοκρασίας 30 ημέρες μετά την φύτευση σε αντίθεση με το ενιαίο εύρος στην περίπτωση της ντομάτας. Επίσης είναι αξιοπρόσεκτη η μεγάλη διαφορά μεταξύ ελάχιστης και μέγιστης θανατηφόρας θερμοκρασίας.

Οι φαινολογικές φάσεις που περιγράφονται είναι η φύτευση, το φύτευμα, η ανάπτυξη θυσάνου, χνουδιού και η συγκομιδή. Για την επιλογή σημαντικών στοιχείων για την κατασκευή του μοντέλου, όπως η θερμοκρασία η υγρασία του εδάφους και η εξατμισοδιαπνοή, απαιτείται πιο εξειδικευμένη εξέταση μεμονωμένων σημαντικών στοιχείων όσο αφορά τις αντιδράσεις της καλλιέργειας. Επομένως σημαντικά στοιχεία της παραμέτρου της θερμοκρασίας είναι η σχετική ελάχιστη και μέγιστη θερμοκρασία, η συχνότητα μιας θερμοκρασίας κατά την διάρκεια ενός συγκεκριμένου φαινολογικού σταδίου, οι ημερήσιες διημερήσιες και εποχικές αλλαγές στη θερμοκρασία κτλ. Με ανάλογο τρόπο προκύπτουν τα σημαντικά στοιχεία και για άλλες παραμέτρους.

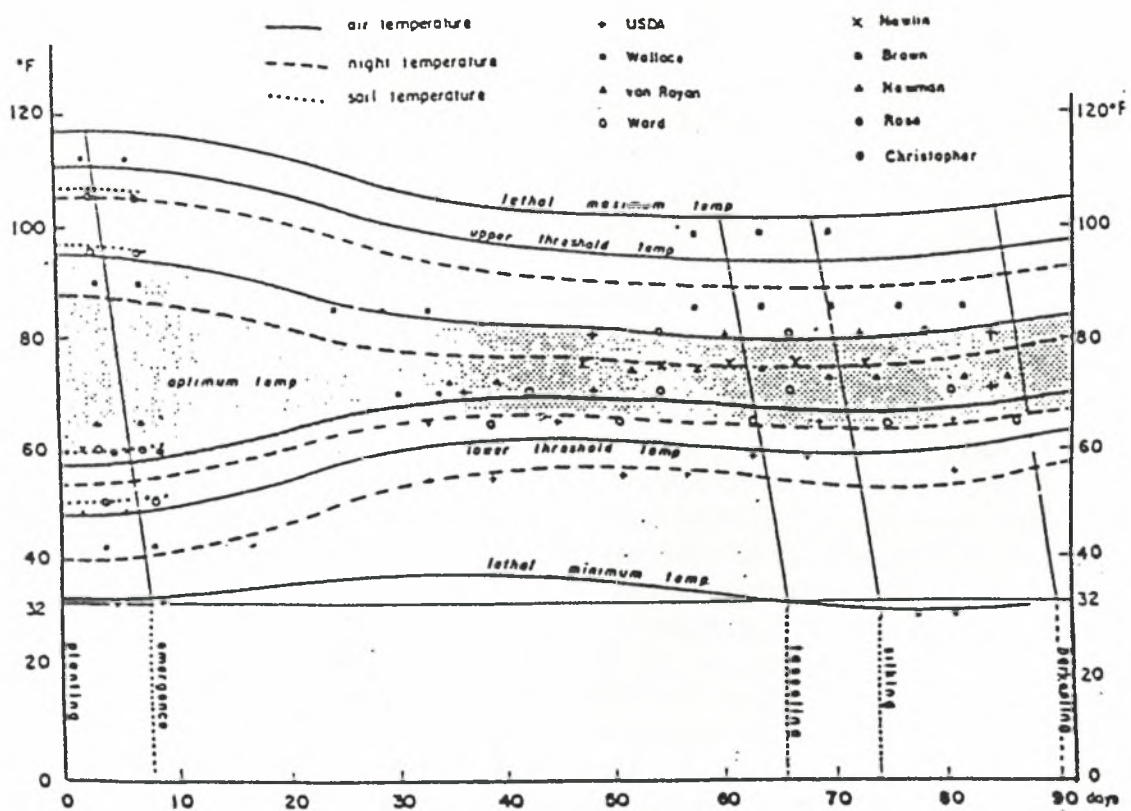
Έχει σημασία να αναγνωρίζονται τα χαρακτηριστικά των παραπάνω παραμέτρων. Χαρακτηρίζονται οπωσδήποτε από ένα ή περισσότερα από τα παρακάτω:

- το σχετικό και το απόλυτο μέγεθος κάθε στοιχείου, τόσο όσο αφορά την ένταση όσο και την διάρκεια

- τις αλλαγές στο μέγεθος για διαφορετικές χρονικές ακολουθίες

- τον υπολογισμό των άκρων τιμών για κάθε στοιχείο.

Με βάση αυτά τα χαρακτηριστικά μπορεί να βρεθεί μια νέα παράμετρος για την αντιμετώπιση του προβλήματος. Το σχετικό μέγεθος μιας παραμέτρου, όπως η σχετική ελάχιστη βροχόπτωση, είναι πολύ πιο σημαντικό από την απόλυτη τιμή στις μελέτες αντίδρασης των καλλιεργειών.



Σχήμα 3.3 Θερμική αντίδραση του καλαμποκιού.

Καθώς η σχετική ελάχιστη βροχόπτωση ορίζεται ως η μικρότερη συγκέντρωση βροχής για δοσμένη περίοδο εντός συγκεκριμένης αυξητικής εποχής, αναφέρεται στην ξηρότερη περίοδο αυτής της εποχής. Αν χρησιμοποιηθεί ως μονάδα χρόνου η εβδομάδα τότε μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως μονάδες και τα πολλαπλάσια της, δηλαδή 1,2,3,...,n εβδομάδες. Η αυξητική εποχή αναφέρεται στην περίοδο από την ημέρα φύτευσης ως την ημέρα συγκομιδής. Ομοίως η σχετική μέγιστη βροχόπτωση αντιπροσωπεύει την υγρότερη περίοδο μιας αυξητικής εποχής, αν η βροχόπτωση χρησιμοποιηθεί ως μέτρο της υγρασίας. Κατά τον ίδιο τρόπο η σχετική ελάχιστη και μέγιστη θερμοκρασία αντιστοιχεί στην ψυχρότερη και την θερμότερη περίοδο μιας εποχής και η σχετική ελάχιστη και μέγιστη νέφωση αναφέρεται στην ποσότητα των νεφών που παρατηρείται κατά τις περισσότερες και λιγότερες νεφελώδεις περιόδους της εποχής, αντίστοιχα.

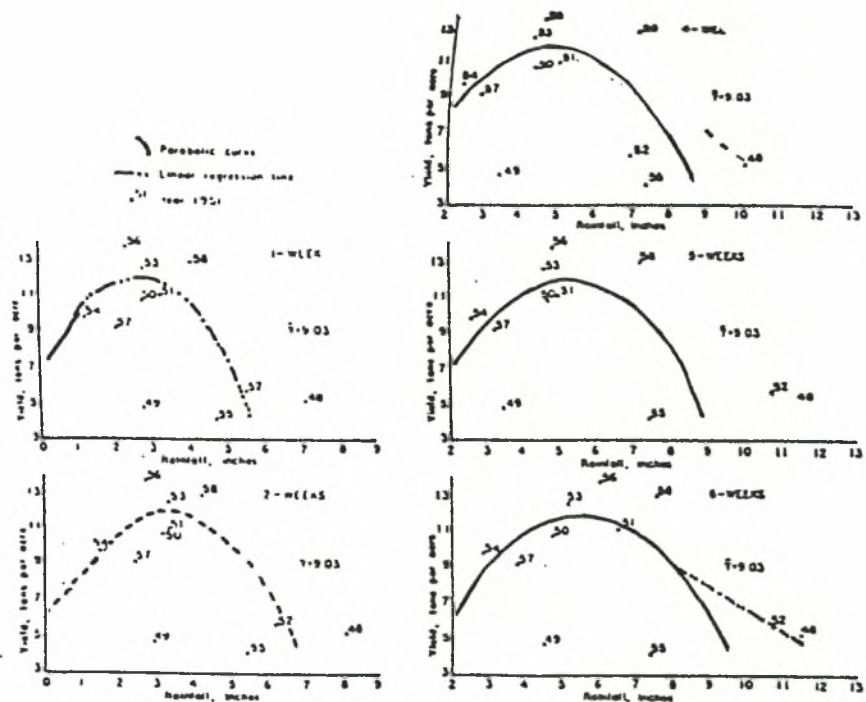
Μελετώντας την παραγωγή ντομάτας στο Wyoming του Delaware για την περίοδο (1948-1958), ο Wang (1963) βρήκε ότι η σχετική μέγιστη βροχόπτωση  $R_R$  αποτελεί καλή παράμετρο της βροχόπτωσης.

Οι τιμές της  $R_R$  έχουν υπολογισθεί από έτος σε έτος κατά την διάρκεια της ανθοφορίας και κυμαινόνταν μεταξύ 1,26" και 7,03" με αριθμητικό μέσο 3,50" για διάστημα μιας εβδομάδας και μεταξύ 2,35" και 10,08" με μέσο 5027" για διάστημα 4 εβδομάδων. Η παραγωγή κυμαινόνταν μεταξύ 4,1 και 13,07 τόνους ανά εκτάριο με μέσο 9,03 , τυπική απόκλιση 3,69 και συντελεστή παραλλακτικότητας 40,86 %.

Στο σχήμα 3.4 παρουσιάζεται η σχεδίαση μιας σειράς διαγραμμάτων διασποράς με τεταγμένη την παραγωγή ντομάτας σε τόνους ανά εκτάριο και τετμημένη τις τιμές του  $R_R$  σε ίντσες. Οι αριθμοί δίπλα από τα σημεία αντιστοιχούν στα έτη 1948, 1949, κ.ο.κ. Φαίνεται ότι, όταν οι τιμές του  $R_R$  είναι πολύ χαμηλές κατά την διάρκεια της ανθοφορίας, η παραγωγή μειώνεται, δηλαδή η βροχόπτωση δρα ως περιοριστικός παράγοντας. Αυτό επίσης ισχύει όταν οι τιμές του  $R_R$  είναι πολύ υψηλές οπότε η βροχή λειτουργεί ως επιβραδυντικός παράγοντας.

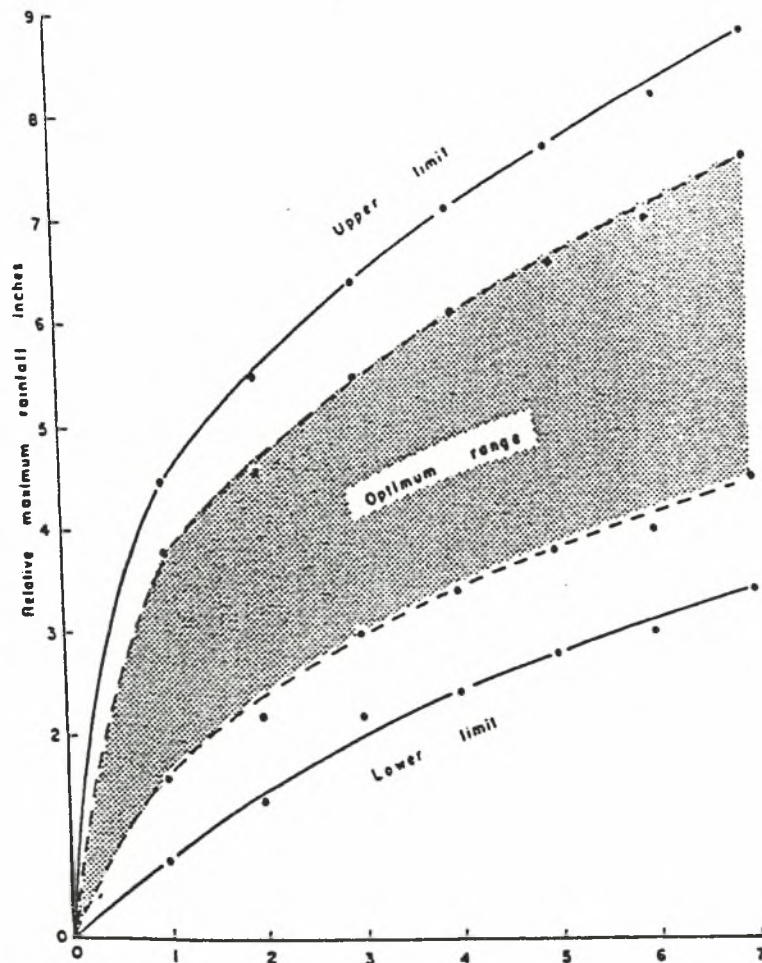
Αυθαίρετα επιλέχθηκαν ως βέλτιστη παραγωγή οι περιπτώσεις όπου η παραγωγή βρίσκεται πάνω από μίση τυπική απόκλιση πάνω από την μέση παραγωγή. Αν η ευθεία των 11,0 τόνων ανά εκτάριο σχεδιαστεί παράλληλη στην ευθεία της μέσης παραγωγής τότε κάθε παραγωγή πάνω από αυτή την ευθεία θεωρείται βέλτιστη παραγωγή. Επομένως οι τιμές της  $R_R$  που βρίσκονται σε αυτή την περιοχή αντιστοιχούν στην επιθυμητή ποσότητα βροχόπτωσης.

Σε καθένα από τα διαγράμματα διασποράς υπάρχουν δυο ακολουθίες τιμών, όποτε μπορούν να σχεδιαστούν οι ευθείες θετικής και αρνητικής παλινδρόμησης με την μέθοδο των ελάχιστων τετράγωνων. Προκύπτουν έτσι τρία σημεία τομής της ευθείας μέσης παραγωγής (-Y) και των δυο ευθειών παλινδρόμησης. Μπορεί να σχεδιαστεί μια παραβολή η οποία να διέρχεται από αυτά τα τρία σημεία όπως φαίνεται στο σχήμα 3.4 . Οι τιμές της  $R_R$  που αντιστοιχούν στα σημεία τομής στην αριστερή πλευρά του διαγράμματος διασποράς ( δηλαδή η τομή μεταξύ της αριστερής ευθείας παλινδρόμησης και της ευθείας της -Y) καθορίζουν το κατώτερο όριο, κάτω από το οποίο μειώνεται η παραγωγή. Ομοίως οι τιμές της  $R_R$  που αντιστοιχούν στα σημεία τομής στην δεξιά πλευρά του διαγράμματος διασποράς καθορίζουν το ανώτερο όριο, πάνω από το οποίο η παραγωγή θα αρχίσει και πάλι να μειώνεται.



**Σχήμα 3.4** Εβδομαδιαία σχετική μέγιστη βροχόπτωση με τεταγμένη την παραγωγή ντομάτας κατά την περίοδο της ανθοφορίας στο Wyoming του Delaware, (1948-1958).





**Σχήμα 3.5** Σχετική μέγιστη βροχόπτωση σε διαδοχικές εβδομάδες με τεταγμένη την παραγωγή ντομάτας στο Wyoming του Delaware, (1948-1958).

Όταν οι τιμές της  $R_R$  εικονίζονται σε σχέση με τις εβδομάδες, παρουσιάζονται οι αθροιστικές καμπύλες των ανώτερων και κατώτερων ορίων όπως φαίνεται από το σχήμα 2.5. Το βέλτιστο εύρος που εικονίζεται στο σχήμα 3.5 λαμβάνεται από τις τιμές της  $R_R$  που αντιστοιχούν στα δυο σημεία τομής μεταξύ της παραβολής και της ευθείας των 11,0 τόνων. Το σχήμα 3.5 δίνει μια πρώτη προσέγγιση των απαιτήσεων της ντομάτας σε σχετική μέγιστη βροχόπτωση.

Η παράμετρος  $R_R$  της σχετικής ελάχιστης βροχόπτωσης χρησιμοποιήθηκε από τον Wang στη μελέτη του καλαμποκιού sweet corn, των μπιζελιών, της ντομάτας, του αγγουριού και άλλων λαχανικών. Ο Wang βρήκε ότι ο υπολογισμός της  $R_R$  για χρονικό διάστημα τριών με πέντε εβδομάδων δίνει την καλύτερη συσχέτιση με την παραγωγή. Η συσχέτιση μπορεί να είναι θετική ή αρνητική ανάλογα με το είδος και την ποικιλία του φυτού καθώς και το στάδιο ανάπτυξης του. Για μια σειρά πειραματικών δεδομένων με μέγεθος δείγματος μεταξύ 10 και 20 ο συντελεστής γραμμικής συσχέτισης κυμαίνεται μεταξύ 0,58 και 0,94.

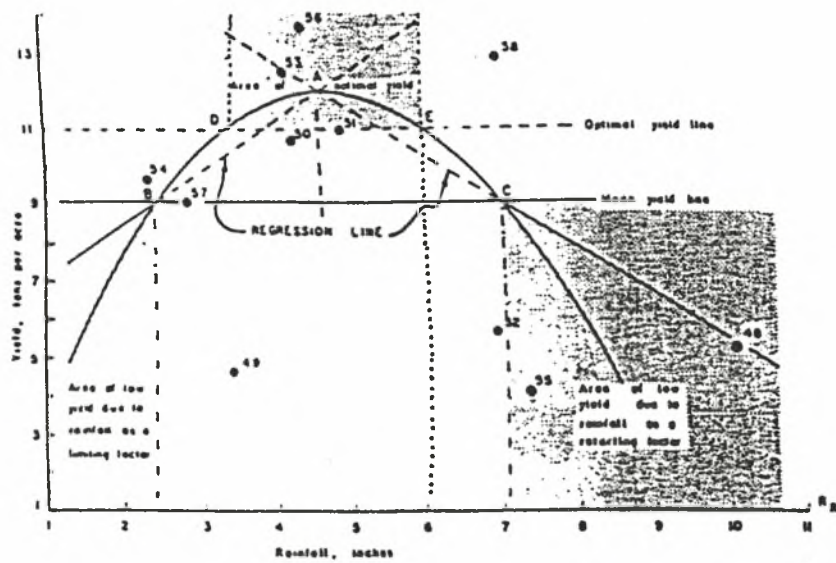
Η εμφάνιση μεγάλης ποικιλίας συσχετίσεων υποδεικνύει ότι ορισμένες φορές κυριαρχούν οι πολλαπλές επιδράσεις του περιβάλλοντος και όχι ο μεμονωμένος παράγοντας, στην προκείμενη περίπτωση η  $R_R$ . Στην περίπτωση της ντομάτας το σχήμα 3.6 παρουσιάζει την  $R_R$  σε συνάρτηση με την παραγωγή για διάστημα τεσσάρων εβδομάδων κατά το αναπαραγωγικό στάδιο.

Το σχήμα 3.7 παρουσιάζει την σχέση μεταξύ της παραγωγής καλαμποκιού, για μεμονωμένα έτη (1950-1954) και του ύψους βροχής στο διάστημα μεταξύ φύτευσης και ανάπτυξης θυσάνου στο Green Bay του Wisconsin. Η τεταγμένη είναι η απόκλιση της παραγωγής και η τετμημένη η σχετική ελάχιστη βροχόπτωση. Το έτος σημειώνεται πάνω δεξιά από τις κουκίδες, όπως και στο σχήμα 3.4. Οι μαύρες κουκίδες αντιστοιχούν στην ποικιλία Michael Leonard Tendermost και οι λευκές στην ποικιλία Michael Leonard Tenderblonde.

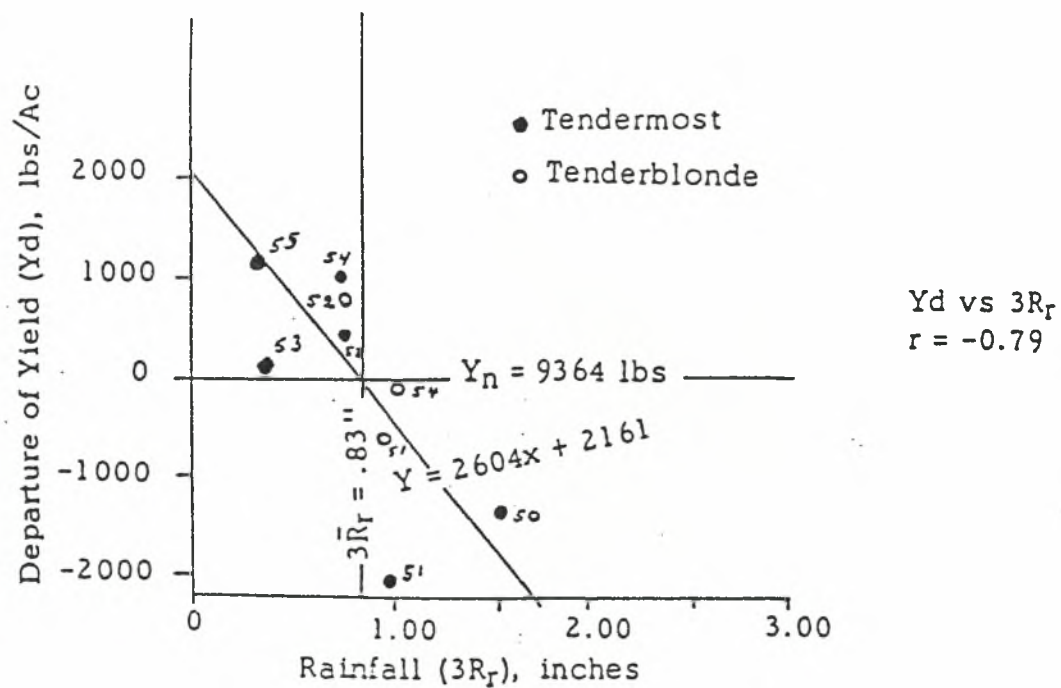
Η παραγωγή για την ποικιλία Tendermost κυμαίνεται μεταξύ 7351 και 10333 λίβρες ανά εκτάριο, με μέση παραγωγή 9050 ενώ για την Tenderblonde μεταξύ 8811 και 10623 λίβρες ανά εκτάριο, με μέση παραγωγή 9756. Η μέση παραγωγή και για τις δύο ποικιλίες είναι 9364 λίβρες ανά εκτάριο και αντιστοιχεί στο σχήμα 3.7 στην ευθεία μηδενικής απόκλισης. Ο μέσος αριθμός ημερών μεταξύ φύτευσης και συγκομιδής είναι 98 για την Tendermost και 95 για την Tenderblonde ενώ οι τιμές κυμαίνονται μεταξύ 87 και 109 ημέρες και για τις δυο ποικιλίες.

Το μέσο χρονικό διάστημα μεταξύ φύτευσης και πρώτου θυσάνου είναι 53 ημέρες και για τις δυο ποικιλίες μαζί ενώ οι τιμές ποικίλουν από 46 ως 60 ημέρες. Για τις 3 τιμές της  $R_R$  (που αντιστοιχούν σε 3 διαδοχικές εβδομάδες) κατά την διάρκεια αυτής της περιόδου, ο μέσος όρος ήταν 0,83" βροχής, το οποίο ποίκιλε από 0,33" ως 1,62" από έτος σε έτος.

Βρέθηκε ότι αν η βροχόπτωση είναι χαμηλότερη από 3"  $R_R$  ή 0,83" τότε η παραγωγή είναι ίση ή μεγαλύτερη από την φυσιολογική. Ομοίως αν η βροχόπτωση είναι μεγαλύτερη από 3"  $R_R$  ή 0,83" τότε η παραγωγή είναι ίση ή μικρότερη από την μέση παραγωγή.



**Σχήμα 3.6** Σχετική μέγιστη βροχόπτωση στη ντομάτα για διάστημα τεσσάρων εβδομάδων κατά το αναπαραγωγικό στάδιο.



**Σχήμα 3.7** Παραγωγή καλαμποκιού στο διάστημα μεταξύ φύτευσης και ανάπτυξης θυσάνου για τα έτη 1950-1954 στο Green Bay του Wisconsin.



Ο αρνητικός συντελεστής γραμμικής συσχέτισης (  $r$  ) είναι  $-0,79$  (  $r^2=0,62$   $P=0,02$  ) και η ευθεία παλινδρόμησης εκφράζεται από τον τύπο:

$$Y_d = - 2604 ( 3 R_r ) + 2161 \quad (3-26)$$

όπου  $Y_d$  είναι η απόκλιση της παραγωγής σε λίβρες ανά εκτάριο και  $3 R_r$  είναι η σχετική ελάχιστη βροχόπτωση που αντιστοιχεί σε 3 διαδοχικές εβδομάδες.

Η ευθεία μηδενικής απόκλισης και η ευθεία της μέσης  $3 R_r$  χωρίζουν το διάγραμμα διασποράς σε τέσσερα τεταρτημόρια. Το δεύτερο τεταρτημόριο δείχνει την ποσότητα βροχής που είναι ευνοϊκή για την παραγωγή, ενώ το τέταρτο το αντίθετο. Το τελευταίο υποδεικνύει ότι η βροχόπτωση αποτελούσε επιβραδυντικό παράγοντα - ή ότι η συνήθης ποσότητα βροχής ήταν υπερβολικά μεγάλη -στη διάρκεια αυτής της περιόδου.

Το σχήμα 3.8 παρουσιάζει την σχέση μεταξύ της παραγωγής του καλαμποκιού Victory Golden Sweet Corn και του ύψους της σχετικής ελάχιστης βροχόπτωσης ( $3 R_r$ ) για το διάστημα μεταξύ του πρώτου "silking" και της συγκομιδής. Το διάγραμμα αφορά τα έτη 1949-1959 για την Janesville του Wisconsin. Οι συντεταγμένες και η παρουσίαση του διαγράμματος διασποράς είναι ανάλογες με αυτές του σχήματος 3.7. Η παραγωγή κυμαίνεται μεταξύ 3802 και 15623 λίβρες ανά εκτάριο με μέση παραγωγή 10960 λίβρες ανά εκτάριο. Οι τιμές του  $3 R_r$  για την περίοδο αυτή κυμαίνονται από 0,16" ως και 2,15" με μέσο την τιμή 1,19" .

Η ευθεία παλινδρόμησης για το σχήμα 3.8 είναι η παρακάτω εξίσωση

$$Y_d = 3056 ( 3 R_r ) - 3627 \quad (3-27)$$

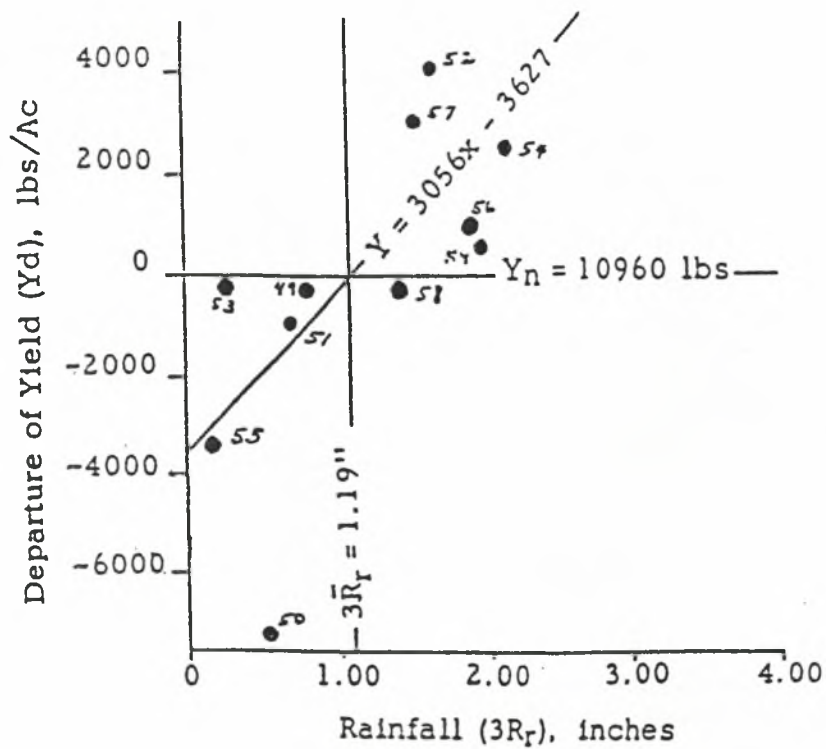
όπου  $r=0,68$   $r^2=46$   $P=0,02$ .

Συγκριτικά με το σχήμα 3.7, στο σχήμα 3.8 παρατηρείται η αντίστροφη εικόνα εξαιτίας της διαφοράς στα σταδία της ανάπτυξης, την τοποθεσία και την ποικιλία του φυτού.

Στην περίπτωση του Green Bay, όταν η παράμετρος  $3R_r$  εφαρμόστηκε σε φαινολογικά σταδία διαφορετικά από τη φύτευση έως το πρώτο ξεφούντισμα, παρατηρήθηκε αρνητική γραμμική συσχέτιση κυμαινόμενη από  $-0,14$  έως  $-0,75$ . Τα φαινολογικά στάδια που χρησιμοποιήθηκαν ήταν:

1. φύτευση έως στάδιο γάλακτος,
2. στάδιο γάλακτος έως συγκομιδή και
3. φύτευση έως συγκομιδή.

Από τα διάφορα χρονικά διαστήματα που χρησιμοποιήθηκαν στις μελέτες συσχέτισης, βρέθηκε ότι ένα διάστημα τριών εβδομάδων είναι η σημαντική περίοδος κατά τη διάρκεια του σταδίου της βλάστησης και έτσι το  $3R_r$  είναι σημαντικό στοιχείο. Όταν χρησιμοποιήθηκαν οι παράμετροι βροχόπτωσης crop-drying day για 8 διαδοχικές ημέρες ( $C_8$ ) και crop-rainy day ( $R_c$ ) για τη μελέτη κατά το φαινολογικό στάδιο από το στάδιο του γάλακτος έως τη συγκομιδή, παρατηρήθηκαν γραμμικές συσχετίσεις της τάξης του 0,60 και  $- 0,46$  αντίστοιχα. Αυτές οι συσχετίσεις ήταν χαμηλότερες από την παράμετρο  $3R_r$  ( $r = - 0,75$ ). Ωστόσο για την ολική βροχόπτωση ( $T_r$ ) και για τον ολικό αριθμό βροχερών ημερών ( $R$ ) στο ίδιο φαινολογικό στάδιο βρέθηκαν συσχετίσεις της τάξης του 0,40 και 0,07 αντίστοιχα.



$Y_d \text{ vs } 3R_r$   
 $r = 0.68$

**Σχήμα 3.8** Σχέση μεταξύ της παραγωγής του καλαμποκιού Victory Golden Sweet Corn και του ύψους της σχετικής ελάχιστης βροχόπτωσης ( $3 R_r$ ) για το διάστημα μεταξύ του πρώτου "silking" και της συγκομιδής τα έτη 1949-1959, στην Janesville του Wisconsin.

Αυτές οι χαμηλές συσχετίσεις δείχνουν ότι η κλασική στατιστική μελέτη με τη χρήση του  $T_r$  και του  $R$  δεν θα αποκάλυπτε την αντίδραση του φυτού.

Με άλλα λόγια η αύξηση και ανάπτυξη του φυτού δεν επηρεάζεται από τις παραμέτρους  $T_r$  και  $R$ . Για παράδειγμα η crop-rainy day έδωσε πάντα υψηλότερη συσχέτιση από την rainy day για όλες τις καλλιέργειες που δοκιμάσθηκαν επειδή το  $R_c$  είναι ένα μέτρο της ενεργής βροχόπτωσης ενώ το  $R$  δεν είναι.

Ομοίως στην περίπτωση του Janesville για το φαινολογικό στάδιο από το στάδιο του γάλακτος έως τη συγκομιδή, οι συνιστώμενες παράμετροι βροχόπτωσης όπως  $3R_r$ ,  $C_4$  και  $R_c$  έχουν γραμμικούς συντελεστές συσχέτισης 0,68, - 0,64 και 0,40 αντίστοιχα, ενώ η γραμμική συσχέτιση για το  $T_r$  και το  $R$  είναι 0,10 και 0,31 αντίστοιχα. Ξανά, αυτό δείχνει ότι οι προτεινόμενες παράμετροι πρέπει να υιοθετηθούν.

Στην περίπτωση του μπιζελιού τύπου Alaska στο Rosendale, Wisconsin κατά την περίοδο 1946-1954, οι Wang & Bryson (1956) βρήκαν ότι η βροχόπτωση δρα σαν περιοριστικός παράγοντας αν το  $R_r$  για 4 διαδοχικές εβδομάδες είναι περίπου 1,03" ή μικρότερο, με αποτέλεσμα μια σοδειά μικρότερη από 2124 pounds/acre. Τα δεδομένα δείχνουν ότι για την περίοδο που μελετήθηκε οι υψηλότερες και χαμηλότερες σοδείες κυμάνθηκαν από 1596 έως 2584 pounds/acre.

Στην περίπτωση των αγγουριών στην Alma, Michigan οι Wang & Singh (1961) βρήκαν ότι όταν το  $R_R$  σε 5 διαδοχικές εβδομάδες είναι μεταξύ 4,23" και 7,02", η άριστη σοδειά κυμαίνεται από 103 έως 203 bushels/acre. Είναι 1,21" έως 2,14" για την ίδια άριστη σοδειά όταν χρησιμοποιείτε το  $R_r$ . Τα δεδομένα δείχνουν ότι η μέση σοδειά είναι 103 bushels/acre, η τυπική απόκλιση είναι 43, το C.V. είναι 42% και το εύρος είναι από 41 έως 206.

Ακόμη μια χρήσιμη παράμετρος βροχόπτωσης είναι οι περίοδοι αιχμής της βροχόπτωσης. Θα χρησιμοποιηθεί για επεξήγηση η σοδειά του γλυκοκαλαμποκιού και των φασολιών στο Hancock και το Janesville, Wisconsin. Η σοδειά δυο ποικιλιών φασολιών των Tendergreen και Processor που καλλιεργήθηκαν στο Hancock κατά την περίοδο 1953-1958 χρησιμοποιήθηκε για τη μελέτη της παραμέτρου των περιόδων αιχμής. Ο σκοπός ήταν να ελεγχθεί η επίδραση της διάρκειας και του μεγέθους της περιόδου αιχμής της βροχόπτωσης πάνω στη σοδειά των φασολιών. Επομένως τα τελικά αποτελέσματα είχαν σαν σκοπό να προγραμματίσουν το χρόνο άρδευσης και να προβλέψουν τη σοδειά.

Η μέση σοδειά για την Tendergreen ήταν 3036 pounds/acre και για την Processor 3660. Οι μεσοί όροι ήταν περίπου του ίδιου μεγέθους με το μέσο όρο 40 ετών στην πολιτεία του Wisconsin που ήταν 3130 pounds/acre σύμφωνα με τους Caroiian & Mueller (1958). Η τυπική απόκλιση και ο συντελεστής παραλλακτικότητας για την Tendergreen ήταν 1691 pounds/acre και 56% αντίστοιχα, και για την Processor 1977 pounds/acre και 54%.

Η σοδειά της Tendergreen κυμάνθηκε από 862 έως 5700 pounds/acre και της Processor από 1165 έως 6340. Οι περίοδοι αιχμής της βροχόπτωσης ταξινομούνται σαν το αρχικό και δευτερεύων εβδομαδιαίο μέγιστο της βροχόπτωσης και ορίζουν την πρώτη και τη δεύτερη αιχμή,  $R_1$  και  $R_2$ , αντίστοιχα. Η ένταση της εβδομαδιαίας βροχόπτωσης σε ίντσες για την πρώτη υψηλή συσσώρευση μετά τη σπορά είναι το  $R_1$ , και για τη δεύτερη υψηλή συσσώρευση είναι το  $R_2$ . Το χρονικό διάστημα σε ημέρες μετά την

ημερομηνία σποράς έως την κεντρική ημερομηνία του  $R_1$  είναι το  $D_1$ , και αυτό μεταξύ του  $R_2$  και της ημερομηνίας συγκομιδής είναι το  $D_2$ . Για την Processor, το  $R_1$  και το  $R_2$ , κυμάνθηκαν από 0,92" έως 2,95". Ο μέσος όρος είναι 1,62". Οι αντίστοιχες τιμές για το  $D_1$  και το  $D_2$  κυμάνθηκαν από 7 έως 27 ημέρες, με μέσο όρο 17 ημέρες για το  $D_1$  και  $15\frac{1}{2}$  ημέρες για το  $D_2$ . Για την Tendergreen, το  $R_1$  και το  $R_2$  κυμάνθηκαν από 0,68" έως 2,70" αντίστοιχα, με μέσο όρο 1,72" για το  $R_1$  και 1,81" για το  $R_2$ . Η αντίστοιχη τιμή του  $D_1$  κυμάνθηκε από 7 έως 24 ημέρες με μέσο όρο 16 ημέρες, και του  $D_2$  από 7 έως 21 ημέρες με μέσο όρο  $12\frac{1}{2}$  ημέρες.

Βρέθηκε ότι η σοδειά μεταβάλλεται ανάλογα με το  $R_2$  και αντιστρόφως ανάλογα με το  $D_2$  και το  $R_1$ . Οι τρεις παράμετροι που συνδέονται με την εκτιμώμενη σοδειά των φασολιών ( $Y_e$ ) διατυπώθηκαν με την συσχέτιση βαθμού του Spearman σαν:

$$Y_e = \bar{k} \left( \frac{x_1}{D_2} + \frac{x_2}{R_1} + x_3 R_2 \right) \quad (3-28)$$

όπου  $\bar{k}$  είναι ο συντελεστής του μέσου παράγοντα μετατροπής της βροχόπτωσης σε σοδειά και  $x_1$ ,  $x_2$  και  $x_3$  είναι συντελεστές για το  $D_2$ , το  $R_1$  και το  $R_2$  αντίστοιχα. Οι τιμές  $\bar{k}$ ,  $x_1$ ,  $x_2$  και  $x_3$  είναι σταθερές, και οι μονάδες τους προσαρμόζονται για να ανταποκριθούν στις απαιτήσεις της διαστατικής συνέπειας. Έτσι όταν η προηγούμενη εξίσωση εφαρμόζεται στην Tendergreen γίνεται:

$$Y_e = 24,5 \left( \frac{17,0}{D_2} + \frac{41,5}{R_1} + \frac{41,5}{R_2} \right) \quad (3-29)$$

και όταν εφαρμόζεται στην Processor γίνεται:

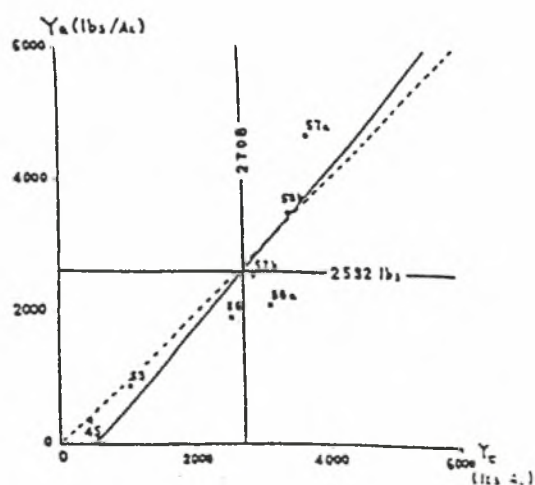
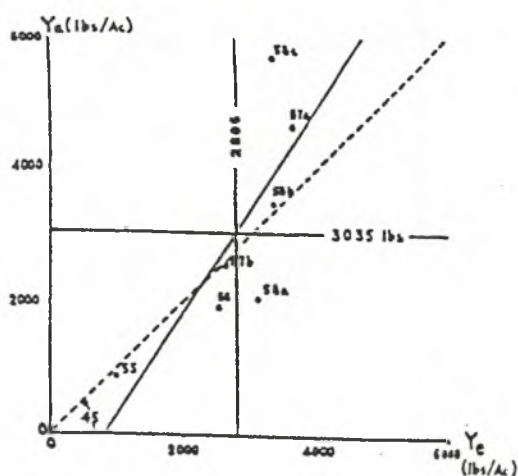
$$Y_e = 15,7 \left( \frac{2,8}{D_2} + \frac{15,1}{R_1} + \frac{82,1}{R_2} \right) \quad (3-30)$$

Οι τιμές του  $x_1$  του  $x_2$  και του  $x_3$  των παραπάνω εξισώσεων αποκτήθηκαν μέσω του συντελεστή συσχέτισης βαθμού του Spearman. Αυτό έγινε βάζοντας τα δομένα της σοδειάς, για κάθε ατομική σοδειά σε 1000 (round class) διαστήματα ( $1/D_2$  vs. 5000-5999 lbs./A yield).

Ο βαθμός συσχέτισης για το  $1/D_2$  για κάθε ποικιλία ορίζεται σαν  $x'_1$ . Ομοίως για το  $1/R_1$  είναι  $x'_2$  και για το  $1/R_2$  είναι  $x'_3$ . Τα αποτελέσματα, μετά το ζύγισμα των  $x'_1$ ,  $x'_2$ ,  $x'_3$  σε ανάλογες περιόδους μπορούν να ορισθούν σαν  $x_1$ ,  $x_2$ ,  $x_3$ . Αυτοί είναι οι συντελεστές των  $1/D_2$ ,  $1/R_1$  και  $1/R_2$  στις εξισώσεις (3-29) και (3-30). Η τιμή  $k$  του για κάθε ατομική χρονία αποκτάται αντικαθιστώντας δοσμένες τιμές κάθε έτους  $Y_a$ ,  $1/D_2$ ,  $1/R_1$  και  $R_2$  στην εξίσωση (3-28).

Σημειώνεται ότι το  $Y_a$  σε αντίθεση με το  $Y_e$  χρησιμοποιείται για την απόκτηση των τιμών του  $k$ .





**Σχήματα 3.9 και 3.10** Εκτιμώμενη παραγωγή ποικιλιών φασολιών των Tendergreen και Processor αντίστοιχα που καλλιεργήθηκαν στο Hancock κατά την περίοδο 1953-1958

Ο αριθμητικός μέσος όρος όλων των  $k$  για κάθε ατομική χρονία ορίζεται σαν  $\bar{k}$ . Έτσι το  $\bar{k}$  για την Tendergreen είναι 29,5 και για την Processor είναι 15,8. Αυτό που αποκτήθηκε από τις δυο παραπάνω εξισώσεις είναι η εκτιμώμενη σοδειά. Εξισώνοντας την εκτιμώμενη σοδειά  $Y_e$  με την πραγματική  $Y_a$  για κάθε έτος τότε:

$$Y_a = 2,02 Y_e - 3900 \quad (3-31)$$

Ενώ για την Processor:

$$Y_a = 1,19 Y_e - 631 \quad (3-32)$$

Σχεδιάζοντας το  $Y_e$  σε σχέση με το  $Y_a$  για την Tendergreen και για την Processor κατασκευάζονται τα σχήματα 3-9 και 3-10 αντίστοιχα.

Εφαρμόζοντας την ίδια τεχνική στα δεδομένα του γλυκοκαλαμποκιού Victory Golden του Janesville (σχ. 3-8), με την διάφορα ότι χρησιμοποιείται ένα διάστημα δυο εβδομάδων για την περίοδο αιχμής της βροχόπτωσης, σχηματίζετε η ακόλουθη εξίσωση:

$$Y_e = 12,8 (38,5R_3 + 38,5 R_4 + 23,0 D_2) \quad (3-33)$$

όπου  $R_3$  και  $R_4$  είναι η τρίτη και τέταρτη περίοδος αιχμής της βροχόπτωσης διάρκειας δυο εβδομάδων, αντίστοιχα. Με την παραπάνω εξίσωση παρατηρείται γραμμική συσχέτιση της τάξης  $r=0,72$ .

Στη μελέτη των σχέσεων θερμοκρασίας και σοδειάς, τα θερμικά μοντέλα της τομάτας (σχ. 3.2) και του γλυκοκαλαμποκιού (σχ. 3.3) θα ήταν χρήσιμοι οδηγοί στην ερευνά. Τα δεδομένα της τομάτας από το Wyoming, Delaware που αναφέρθηκαν προηγουμένως (σχ. 3.4), χρησιμοποιούνται εδώ σαν επεξήγηση.

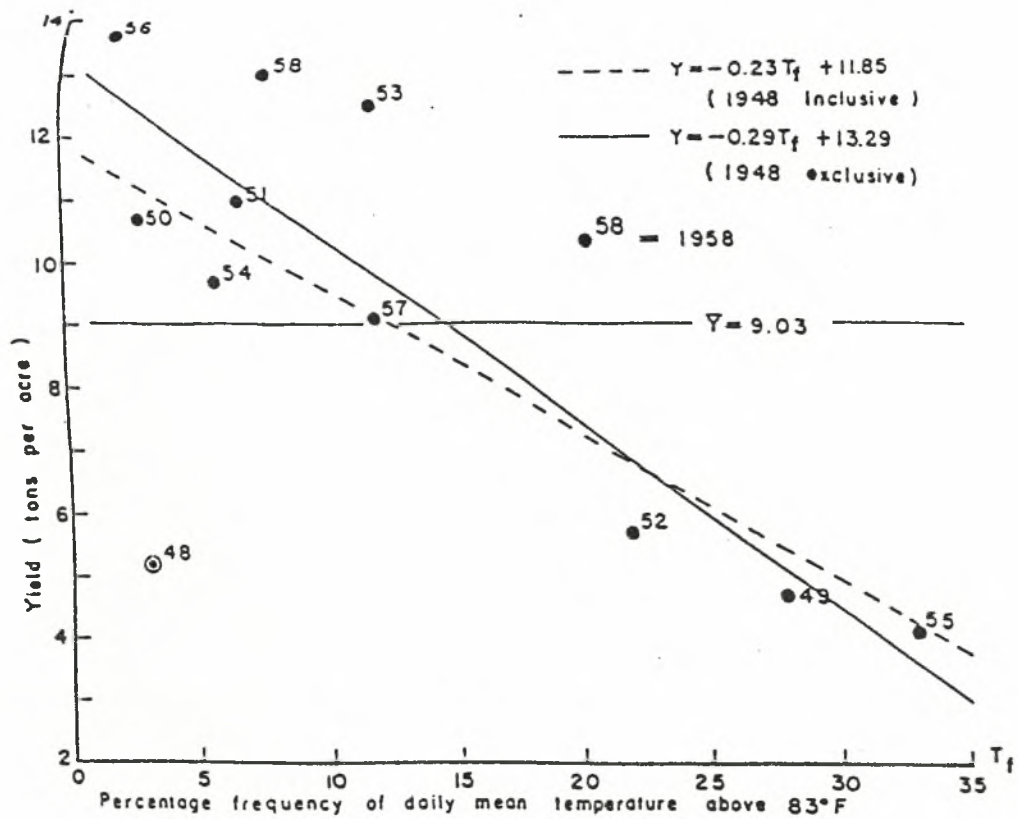
Από τότε που το ανώτερο όριο του άριστου εύρους για τις τομάτες μεταξύ άνθισης και συγκομιδής είναι  $83^\circ\text{F}$ , και το κατώτερο όριο είναι  $66^\circ\text{F}$  (σχ. 3.2), μια υψηλή σοδειά αναμένεται όταν η μέση ημερήσια θερμοκρασία είναι μεταξύ  $66^\circ\text{F}$  και  $83^\circ\text{F}$ . Αντίθετα μια χαμηλή σοδειά αναμένεται αν η μέση ημερήσια θερμοκρασία είναι υψηλότερη από  $83^\circ\text{F}$  ή χαμηλότερη από  $66^\circ\text{F}$ . Η ποσοστιαία συχνότητα της θερμοκρασίας που είναι υψηλότερη από τους  $83^\circ\text{F}$  κατά τη διάρκεια της αναπαραγωγικής περιόδου έχει υπολογισθεί.

Παρατηρήθηκε ένας αρνητικός συντελεστής γραμμικής συσχέτισης  $r=-0,90$ ,  $r^2=0,81$  και  $P<0,01$  με εξαίρεση το έτος 1948. Τα αποτελέσματα δίνονται στο σχ. 7.10. Η εξίσωση παλινδρόμησης είναι:

$$Y = -0,29 T_f + 13,29 \quad (3-34)$$

όπου  $Y$  είναι η σοδειά της τομάτας σε tons/acre και  $T_f$  είναι η ποσοστιαία συχνότητα της θερμοκρασίας.

Κατά τη διάρκεια του αναπαραγωγικού σταδίου, το έτος 1948 είχε 10,08" σαν σχετική μέγιστη βροχόπτωση ή τιμή  $R_R$  για 4 διαδοχικές εβδομάδες και 2,70" σαν σχετική ελάχιστη βροχόπτωση ή  $R_r$  σε αντίθεση με το μέσο όρο όλου του έτους  $\bar{R}_R=5,27"$  και  $\bar{R}_r=1,33"$ .



**Σχήμα 3.11** Παραγωγή ντομάτας σε σχέση με την συχνότητα θερμοκρασίας στην διάρκεια του αναπαραγωγικού σταδίου στο Wyoming του Delaware τα έτη 1948-1958 .

Αυτό δείχνει ότι το έτος 1948 ήταν εξαιρετικά υγρό με λίγη ηλιοφάνεια και χαμηλές θερμοκρασίες. Μικρά θερμά διαστήματα 1, 2 και 3 ημερών πάνω από τους 92°F ημερήσιας μέγιστης θερμοκρασίας έχουν επίσης υπολογισθεί. Αυτοί οι 92°F αποκτήθηκαν από μια μέση τιμή της ανώτερης άριστης και της ανώτερης βασικής θερμοκρασίας στο θερμικό μοντέλο της τομάτας κατά τη διάρκεια του αναπαραγωγικού σταδίου μεταφέροντας την ημερήσια μέση σε μια ημερήσια μέγιστη τιμή. Παρατηρήθηκαν συντελεστές συσχέτισης  $r_1 = -0,79$ ,  $r_2 = -0,79$  και  $r_3 = -0,80$  για τα θερμά διαστήματα 1, 2 και 3 ημερών αντίστοιχα.

Ακολουθώντας παρόμοιες διαδικασίες, δοκιμάστηκε το θερμικό μοντέλο του γλυκοκαλαμποκιού, για την εγκυρότητα και τη χρησιμότητα του οποίου χρησιμοποιήθηκαν τα αρχεία του Janesville και του Rosendale, Wisconsin. Τα δεδομένα του Janesville έχουν περιγράψει σύντομα. Τα δεδομένα του Rosendale αποτελούνται από 276 φυτείες για την περίοδο 1946-1954. Η υψηλότερη σοδειά για ένα έτος είναι 5,32 tons/acre ενώ η χαμηλότερη έγγραφη είναι 1,81. Η μέση σοδειά για όλα τα έτη είναι 3,60.

Βρέθηκε ότι η χαμηλότερη άριστη και η χαμηλότερη βασική θερμοκρασία κατά τη διάρκεια 20 και 40 ημερών μετά τη φύτευση και από το ξεφούντισμα έως το στάδιο του γάλακτος, όπως και η υψηλότερη άριστη κατά τη διάρκεια της συγκομιδής όπως φαίνεται στο μοντέλο, είναι στατιστικά σημαντικές. Τα άλλα τμήματα του μοντέλου δεν είναι σημαντικά και μερικά είναι αντιφατικά. Ο συντελεστής συσχέτισης μεταξύ της σοδειάς του καλαμποκιού και της θερμοκρασίας διάφορων επιπέδων για τις δυο περιοχές κατατάσσεται σε πίνακα με σκοπό να φανεί ο βαθμός συμφωνίας (πίνακ. 3.1).

Είτε η εμφάνιση ασυμφωνιών υποδηλώνει λάθη στο μοντέλο είτε όχι, το μοντέλο πρέπει να ελεγχθεί με ένα ευρύ δείγμα δεδομένων. Με τα δεδομένα του Janesville και του Rosendale μόνο υπάρχουν υπολογίσιμες αντιφατικές τάσεις μεταξύ των δυο σετ δεδομένων. Γι'αυτό τοπικοί, μεταβαλλόμενοι και πολλοί άλλοι παράγοντες πρέπει να λαμβάνονται υπ'οψη.

Οι υψηλές συσχετίσεις μεταξύ του αριθμού των ημερών με μέση θερμοκρασία κάτω από 67°F και της σοδειάς του καλαμποκιού ( $r = -0,88$  για το Rosendale και  $r = -0,39$  για το Janesville) κατά τη διάρκεια 20 έως 40 ημερών μετά τη φύτευση θα ήταν χρήσιμες σαν μια πρώτη προσέγγιση για την πρόγνωση. Η εξίσωση παλινδρόμησης για το Rosendale είναι:

$$Y = -0,86 D + 15,9 \quad (3-35)$$

όπου Y είναι η σοδειά του γλυκοκαλαμποκιού σε tons/acre και D είναι ο αριθμός ημερών με μέση θερμοκρασία κάτω από 67°F. Για το σε ένα στάδιο μεταξύ 60 και 80 ημέρες μετά τη φύτευση είναι:

$$Y = -0,61 D + 13,9 \quad (3-36)$$

Η εξίσωση (3-36) είναι χρήσιμη για την επιβεβαίωση της εξίσωσης (3-35).

Η μελέτη μιας μόνο περιβαλλοντικής παραμέτρου άλλης από τη θερμοκρασία και τη βροχόπτωση έχει να κάνει με την ακτινοβολία, την εξετμισοδιαπνοή, την εδαφική υγρασία, τη θερμοκρασία εδάφους και ούτω καθεξής. Ο δείκτης φιλικής επιφάνειας και η έννοια αναχαίτισης του φωτός όπως αναπτύχθηκε από τους McCloud & Alexander το 1961 θα χρησιμοποιηθεί για να εξηγηθεί η επίδραση του φωτός στην αύξηση των φυτών.



**Πίνακας 3.1** Ο συντελεστής συσχέτισης μεταξύ της σοδειάς του καλαμποκιού και της θερμοκρασίας διάφορων επιπέδων για τις δυο περιοχές του Janesville και του Rosendale, Wisconsin.

Arbitrary Classification of Phenological Stages	Station	The first 20 days after planting	From 20 to 40 days after planting	From 40 to 60 days after planting	From 60 to 80 days after planting	From 80 days after planting to harvest
Number of days with daily maximum temperatures above the optimum temperature of:						
		92°F	85°F	82°F	80°F	82°F
	R	---	0.32*	-0.24	0.33*	-0.55
	J	0.12	0.32*	0.37*	0.09	-0.45
Number of days with daily mean temperatures below the optimum temperature of:						
		60°F	67°F	70°F	68°F	68°F
	R	0.90*	-0.88	0.36*	-0.76	0.34
	J	0.03	-0.39	-0.40	-0.46	-0.69
Number of days with daily minimum temperatures below the lower threshold temperature of:						
		42°F	54°F	57°F	54°F	56°F
	R	0.06	-0.39	0.24*	-0.61	0.18
	J	0.16	-0.19	0.51	-0.61	0.03

R stands for Rosendale, J for Janesville. Asterisks indicate that the sign of the coefficient is inconsistent with the model. Underlined figures show that a consistency exists between coefficients, and is significant.

Στη μελέτη για την αποτελεσματικότητα της χρήσης του φωτός, έδωσαν έμφαση στις εσωτερικές σχέσεις της ποσότητας των φύλλων, του προφίλ του φωτός και της καθαρής φωτοσύνθεσης των φυτοκοινοτήτων. Είναι η φυτοκοινότητα που είναι σημαντική στο σχέδιο παρά το ατομικό φυτό ή φύλλο.

Έτσι ο προσδιορισμός του δείκτη φιλικής επιφάνειας και της καθαρής φωτοσύνθεσης σε διάφορες εντάσεις φωτός γίνεται απαραίτητος. Η σχέση έχει δειχθεί από τους McCloyd & Alexander να είναι στενά προσεγγισμένη με την ορθογώνια υπερβολή. Βρήκαν ότι η καθαρή φωτοσύνθεση  $P$  είναι:

$$P = \frac{bI}{1 + aI} - R \quad (3-37)$$

όπου  $I$  είναι η ένταση του φωτός,  $R$  είναι ο ρυθμός αναπνοής και  $a$  και  $b$  είναι σταθερές που χαρακτηρίζουν το σχήμα της καμπύλης της υπερβολής.

### 3.3 Εμπειρική – στατιστική προσέγγιση

Η γεωργία και οι συγγενείς επιστήμες υφίστανται μια ραγδαία εξέλιξη. Τα μαθηματικά, μάλλον όντας περισσότερο ένα χρήσιμο εργαλείο για την περιγραφή αποτελεσμάτων έρευνας και την σύνδεσή τους με θεωρητικές έννοιες, υποστηρίζονται ολοένα και πιο πολύ σαν η μόνη πιθανή προσέγγιση διαφόρων προβλημάτων. Σε συνθήκες επιστημονικής μεθοδολογίας η συνήθης κατάσταση μπορεί να καθοριστεί σαν η αρχή του τελικού σταδίου με τους συνηθισμένους τρόπους επαφής της επιστημονικής έρευνας να είναι κυρίαρχοι.

Τρία στάδια είναι διακριτά στους τρόπους με τους οποίους περιγράφονται και εξηγούνται σχέσεις μεταξύ φυσικού περιβάλλοντος και γεωργικής παραγωγής. Στο πρώτο στάδιο, περιγραφικές προσεγγίσεις επικρατούσαν, με τις σχέσεις μεταξύ καιρού και γεωργικής παραγωγής να εξηγούνται στη βάση της αγρονομίας και της φυσιολογίας φυτού. Αυτή η περιγραφική προσέγγιση αντικαταστάθηκε από μια εμπειρική στατιστική που έδινε έμφαση περισσότερο στην έρευνα για άμεση σχέση μεταξύ εισαγομένων και εξαγομένων σε ένα black box σύστημα. Το τρίτο στάδιο είναι μια ποιοτική θεώρηση της γεωργικής παραγωγής, επιδρώντας στην αλλαγή από μια στατική σε μια δυναμική παρουσίαση των σχέσεων παραγωγής-περιβάλλοντος.

Ένα στατικό μοντέλο είναι μια μαθηματική δομή που κατηγορηματικά δεν περικλείει χρόνο. Επιπροσθέτως τα χαρακτηριστικά της συμπεριφοράς του συστήματος που είναι στην ουσία εξαρτώμενα από το χρόνο πρέπει να απορριφθούν. Επειδή το κάθε τι σ' αυτό τον κόσμο αλλάζει, είτε γρήγορα είτε αργά, τα στατικά μοντέλα είναι πάντα μια προσέγγιση και μερικές φορές πολύ χρήσιμα εξαιτίας της απλότητάς τους. Τα στατικά μοντέλα για τη γεωργία είναι συγχρόνως εμπειρικά-στατιστικά μοντέλα, τα οποία χρησιμοποιούν μια ελάχιστη εκ των προτέρων πληροφόρηση σχετικά με τους φυσικούς μηχανισμούς των διαδικασιών.

Δυο κλασικές εμπειρικές μέθοδοι είναι οι δειγματοληψίες και η εμπειρία των ειδημόνων.

Οι δειγματοληψίες συνίστανται στην συλλογή πληροφοριών από ένα δείγμα αγροτών, χωραφιών, ομάδων χωραφιών ή αντιπροσωπευτικών σημείων για ολόκληρη την περιοχή. Το δείγμα μπορεί να παρθεί από έναν κατάλογο αγροτών ή να εξακριβωθεί από αεροφωτογραφία ή δεδομένα τηλεπισκόπισης. Μια προκαταρκτική στρωματοποίηση ελαττώνει την δουλειά που συνεπάγεται.

Σε δειγματοληψίες με συνέντευξη ο παραγωγός ερωτάται τι παραγωγή περιμένει. Εκτός από τις συνεντεύξεις είναι επίσης πιθανό να εκτελεσθούν αντικειμενικές μετρήσεις και να παρθούν δείγματα από τον αγρό είτε πριν την συγκομιδή ( μέτρηση ή έμμεσοι δείκτες ) είτε κατά την συγκομιδή ( συγκομιδή από έναν ορισμένο αριθμό τεμαχίων εντός του αγρού από τον οποίο γίνεται δειγματοληψία ).

Η παραγωγή των φυτών τότε είναι συνάρτηση των :

- στρεμματική έκταση
- απόσταση των φυτών μεταξύ των γραμμών
- αριθμός φυτών ανά γραμμή
- αριθμός κλάδων ανά φυτό
- αριθμός ταξιανθιών ανά κλάδο
- αριθμός ανθέων ανά ταξιανθία
- μέσο βάρος καρπού ανά ανθός

Η δειγματοληψία διεξάγεται με μια αντικειμενική ή υποκειμενική ( βασισμένη σε ειδήμονα ) προσαρμογή, για περασμένες και μελλοντικές συνθήκες ανάπτυξης. Επίσης η δειγματοληψία διεξάγεται με μια δοσμένη συχνότητα η οποία μπορεί να είναι ετήσια, εβδομαδιαία ή κάθε χ χρόνια. Κάποιες γενικές παρατηρήσεις για τις δειγματοληψίες είναι οι εξής :

- Η μεθοδολογία διαφέρει από χώρα σε χώρα
- Οι δειγματοληψίες γενικά είναι δύσκολο να εκτελεσθούν και έχουν υψηλό κόστος εφαρμογής
- Η χρονική ακρίβεια των δειγματοληψιών δεν είναι εγγυημένη
- Η ακρίβεια των δειγματοληψιών εξαρτάται από την επαναληψιμότητα της δειγματοληψίας και την αξιοπιστία των ατόμων που ερωτώνται
- Η μέθοδος της εμπειρίας των ειδημόνων συνίσταται στην εξαγωγή της εκτίμησης της απόδοσης ενός φυτού, δηλαδή στην εκτίμηση παραγωγής ή πρόγνωση που προέρχεται από μια ή περισσότερες από τις ακόλουθες πηγές:
  - προσωπική εμπειρία (εκτίμηση και ερμηνεία των συνθηκών ανάπτυξης συγκρινόμενες με εμπειρία προηγούμενων χρόνων )
  - δίκτυο ανταποκριτών
  - περιοδικά και ειδικές εκδόσεις
- Η διαθέσιμη δειγματοληψία μπορεί να διεξάγεται με ποικίλη συχνότητα η οποία μπορεί να είναι ετήσια, εβδομαδιαία ή κάθε χ χρόνια. Η μέθοδος αυτή εφαρμόζεται σε πολλές χώρες για πρώτη εκτίμηση / προσέγγιση καθώς και για πληροφορίες εθνικού ενδιαφέροντος.
- Οι περιορισμοί σε αυτή την μέθοδο είναι οι εξής :
  - Υπάρχει μεγάλη εξάρτηση από τον χρόνο που αφιερώνουν οι ειδήμονες και την εμπειρία τους.
  - Η αξιοπιστία είναι κατορθωτή μόνο όταν το έτος ή τα έτη αναφοράς είναι γνωστά με ακρίβεια

Η μέθοδος αυτή μπορεί να είναι αξιόπιστη εάν χρησιμοποιηθεί σαν ένα ποιοτικό εργαλείο που παρέχει μια εκτίμηση της μείωσης ή της αύξησης της αναμενόμενης παραγωγής, συγκρινόμενη με το προηγούμενο έτος ( ή το έτος αναφοράς ).

### 3.4 Βιβλιογραφία Κεφαλαίου 3

1. Alexander, C. W., and D. E. McCloud. 1962: CO<sub>2</sub> uptake (net photosynthesis) as influenced by light intensity of isolated bermudagrass leaves contrasted to that of swards under various clipping regimes. *Crop Sci.* 2 (2) :132-135.
2. Angstrom, A. 1936. A coefficient of humidity of general applicability. *Geograf. Ann.* 18: 245-254.
3. Azzi, G. 1956. *Agricultural ecology*. Constable and Company, Ltd London 424 pp.
4. Beattie, J.H., and W.R. Beattie. 1942. Production of tomatoes for canning and manufacturing. U. S. Dept. Agr. Farmers' Bull. No. 1901. 37 pp.
5. Brougham, R. W. 1955. A study in rate of pasture growth. *Australian J. Agr. Research* 6: 804-812.
4. Budagovsky AI 1964: Evaporation of soil moisture. Nauka, Moscow, 243 pp.
5. Budyco MI 1956: Heat balance at the Earth's surface. *Hydrometeoizdat Leningrad*. 128-139 pp.
6. Budyko MI 1964: An addition to the theory of the influence of climate factors on photosynthesis. *Proc USSR Acad Sci* 158 (2):331-334.
7. Budyco MI, Gandin LS., 1964 : About taking into account characteristics of physics of the atmosphere in agrometeorological research. *Meteorol. Hydrol.* 11:3-11 ,
8. Budyko MI, Gandin LS 1968: An addition to the theory of heat regime of vegetation cover. *Collect Works Main Geophys Observ* 229:69-73.
9. Δαλέζιος Ν. Ρ. 2000: Σημειώσεις Αγρομετεωρολογίας, πανεπιστημιακές παραδόσεις. Βόλος 2000.
10. De Martonne, E. M. 1926. Une nouvelle fonction climatologique: L'indice d'aridite (A new climatological function: aridity index). *Meteorologie* 2: 449-458. (in French)
11. Ehler, J. H. 1915. The temperature of leaves of Pinus in winter. *Am. J. Botany* 2 ( 1 ) : 32-70.
12. Garoian, L., and W.F. Mueller. 1958. Wisconsin canning crop statistics. Dept. Agr. Econ., Univ. Wisconsin (Special publication). 20 pp.
13. Glenday, A. C. 1955. The mathematical separation of plant and weather effects in field growth studies. *Australian J. Agr. Research* 6: 813-822.
14. Kincer, J. B. 1915. A correlation of weather conditions and production of cotton in Texas. *Monthly Weather Rev.* 43 (2): 61-65.
15. Koppen, W. 1936. Das Geographische System der Klimate (The geographical system of climate). In *Handbuch der Klimatologie* Vol. 1, Part C. 44 pp.
16. Lancashire, E.R., T. H. Parks, and A. L. Pierstorff. 1935. Tomatoes for canning. Ohio State Univ. Agr. Coll. Ext. Serv. Bull. 114. 31 pp.



17. Lang, R. 1920: Verwitterung und Bodenbildung als einfuehrung in die Bodenkunde (weathering and soil formation for better understanding in soil sience). Stuttgart. 188 pp.
18. Meyer, A. 1926: Some relationships between climate and soil in Europe. *Chem, der Erde* 2 : 209(?) - 347.
19. Noffsinger, T. L. 1962: World population and maximum crop yield. In S. W. Tromp *Biometeorology*. Pergamon Press (Oxford) pp. 461-470.
20. Nuttonson, M. Y. 1955: Wheat – climate relationships and the use of phenology in ascertaining the thermal and photo-thermal requirements of wheat. *Am. Inst. Crop Ecol.* 388 pp.
21. Porte, W. S. 1959: Commercial production of tomatoes. U. S. Dept. Agr. *Farmer's Bull.* No 2045, 46 pp.
22. Seeley, D. A. 1977: Relation between temperature and crops. *Monthly Weather Rev.* 45(7) : 354-359.
23. Setzer, J. 1946: A new formula for precipitation effectiveness. *Geograph. Rev.* 36: 247-263.
24. Smith, J. W. 1920: *Agricultural meteorology. The effect of weather on crops.* The Macmilan Co. New York. 304 pp.
25. Thornthwaite, C. W. 1931: The climates of North America according to a new classification. *Geograph. Rev.* 21: 635-655.
26. Thornthwaite, C. W. 1948: An approach toward a rational classification of climate. *Geograph. Rev.* 38(1): 56-94.
27. Transeau, E. N. 1905: Forest centers of Eastern America. *Am. Naturalist* 39: 875-889.
28. Vossen p.: An overview of methods for national Crop Yield Forecasting.
29. Wang, J. Y. 1958: An evaluation of some techniques in Agrometeorology. ( Methods relating to problems in cultivated plants ). Ph D. thesis Univ. Wisconsin Madison 172 pp.
30. Wang, J. Y. 1960: A critique of the heat unit approach to plant response studies. *Ecology* 41: 785-791 pp.
31. Wang, J. Y. 1962a: The influence of seasonal temperature ranges on pea production. *Proc. Am. Soc. Hort. Sci.* 80:436-448.
32. Wang, J. Y. 1962b: Methods of crop response studies (emphasis on thermal effects). *Agron. J.* 54(5).
33. Wang, J. Y. 1963: A graphical solution on temperature – moisture response of tomato yield. *Proc. Am. Soc. Hort. Vol.* 81.
34. Wang, J. Y. and H. H. Bomalanski 1958: Objective methods correlating various moisture factors to yield and quality of Alaska peas. 31 pp.
35. Wang, J. Y. and R. A. Bryson, 1956: A study of phytometeorological effects on the growth and development of peas. Dept. Meteorol. Univ. Wisconsin Madison, 165 pp.
36. Wang, J. Y. and K. Nakamura 1960: Thermal response of sweet corn. Dept. Meteorol. Univ. Wisconsin, Madison, 17 pp.
37. Wang, J. Y. and H. Singh, 1961: Yield response of cucumber to rainfall. Dept. Meteorol. Univ. Wisconsin, Madison, 12 pp.
38. Wang, J. Y. and T. W. Tibbits, 1958: Methods for the determination of the water requirements of tobacco. Dept. Meteorol. Univ. Wisconsin, Madison, 25 pp.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΚΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΙΚΗ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ

### 4.1 Δεδομένα για την πρόβλεψη της παραγωγής

Όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο δύο κύρια είδη δεδομένων εμπλέκονται στην πρόγνωση παραγωγής, τα δεδομένα της καλλιέργειας και τα περιβαλλοντικά δεδομένα. Τα δεδομένα της καλλιέργειας αποτελούνται από μετρήσεις αύξησης και ανάπτυξης των φυτών. Η αύξηση των φυτών περιλαμβάνει μετρήσεις όπως το ύψος του φυτού, τη φυλλική επιφάνεια, χλωρό-ξηρό βάρος, διάμετρο βλαστού κ.τ.λ. Η φυτική ανάπτυξη περιλαμβάνει μετρήσεις όπως ημερομηνία φυτρώματος, ημερομηνία εμφάνισης, αριθμός φύλλων, αριθμός ανθέων και καρπών.

Με την ευρεία έννοια, οι περιβαλλοντικές μετρήσεις περιλαμβάνουν όλα τα διαθέσιμα δεδομένα τα οποία περιγράφουν το περιβάλλον μιας καλλιέργειας, όπως κλίση, αποστράγγιση, φυλλική επικάλυψη και κοντινές υδάτινες μάζες. Τα δεδομένα κατατάσσονται σε δύο ομάδες, τα βιοτικά και τα αβιοτικά. Οι βιοτικοί παράγοντες, όπως ο ανταγωνισμός για φως και υγρασία ανάμεσα στα φυτά, μπορεί να μειωθεί με μια μελέτη αγροτικής μετεωρολογίας. Αβιοτικοί παράγοντες θεωρούνται η θερμοκρασία αέρος-εδάφους, υγρασία αέρα –εδάφους κτλ. Επίσης η ένταση, η διάρκεια και η ποιότητα του φωτός περιλαμβάνονται στην κατηγορία των περιβαλλοντικών δεδομένων.

**4.1.1 Περιβαλλοντικά δεδομένα.** Δεδομένα όπως αποτυπώνονται από διάφορα μηχανήματα μέτρησης, συνήθως δεν είναι αρκετά για να χρησιμοποιηθούν από τους αγρομετεωρολόγους. Όπως και για τα δεδομένα καλλιέργειας, έτσι και τα περιβαλλοντικά δεδομένα αποτελούν βασικό βήμα κατά τη διαδικασία της πρόγνωσης.

Στην κατεύθυνση αυτή πρέπει να υπάρχει εξοικείωση με έννοιες όπως εκτίμηση της σχετικής μέγιστης βροχόπτωσης, εκτίμηση της εξατμισοδιαπνοής κ.α. Τα παραπάνω αποτελούν παραμετρικές μεταχειρίσεις των περιβαλλοντικών δεδομένων.

Στην πραγματικότητα δεν υπάρχει τέλος στη μετατροπή δεδομένων περιβάλλοντος σε φόρμες κατάλληλες για προβλέψεις παραγωγής. Σαν βασική αρχή ο χειρισμός δεδομένων πρέπει να ακολουθεί τους νόμους και τις αρχές της φύσης καθώς επίσης και τις φαινολογικές αλληλουχίες.

**4.1.2 Δεδομένα καλλιέργειας.** Τα δεδομένα της καλλιέργειας όπως λαμβάνονται κατόπιν παρατηρήσεων στον αγρό, δεν είναι μπορούν να χρησιμοποιηθούν αμέσως στη μελέτη του συστήματος περιβάλλον / καλλιέργεια. Δύο ενέργειες πρέπει να λάβουν χώρα για τη μετατροπή των δεδομένων σε μια μορφή η οποία να διευκολύνει τη στατιστική επεξεργασία. Αυτές είναι η ταξινόμηση-παρουσία δεδομένων και τροποποίηση των δεδομένων.

**4.1.2.1 Ταξινόμηση και παρουσίαση δεδομένων.** Μια λεπτομερής ταξινόμηση και περιγραφή δεδομένων απόδοσης, ποιότητας και άλλων φαινολογικών χαρακτηριστικών είναι απαραίτητη να γίνει πριν να

αποφασισθεί ποια μέθοδος θα χρησιμοποιηθεί για να διορθωθούν τα δεδομένα της καλλιέργειας.

Η απόδοση και η ποιότητα έχουν οικονομική σημασία για τους παραγωγούς, αλλά αυτό δε σημαίνει πως αποτελούν τους καλύτερους δείκτες για τη μελέτη του περιβάλλοντος της καλλιέργειας. Άλλοι δείκτες μπορεί να είναι πιο ευαίσθητοι στις αλλαγές του περιβάλλοντος. Αυτοί μπορεί να ονομαστούν «φαινολογικά γεγονότα».

Συνήθως, το μέγεθος των καταγεγραμμένων δεδομένων για κάποια ποικιλία μιας καλλιέργειας είναι πολύ μικρή για να έχει στατιστική σημασία. Έτσι, τρόποι για τον συνδυασμό δεδομένων καλλιέργειας δύο ή περισσότερων ποικιλιών θα ήταν σημαντικοί. Η αξιοπιστία των καταγραφών αυτών αποτελεί επίσης μεγάλο πρόβλημα. Για παράδειγμα, εμπορικά στοιχεία δεν είναι τόσο αξιόπιστα όπως πειραματικά δεδομένα. Η χρήση ιστορικών δεδομένων εξαρτάται από την αξιοπιστία τους. Δεν είναι συνήθως ιδανικά, αλλά είναι διαθέσιμα. Από την άλλη μεριά, καινούργια πειραματικά δεδομένα είναι ιδανικά, αλλά δεν είναι διαθέσιμα για μεγάλα δείγματα.

Η ταξινόμηση και παρουσίαση αποδόσεων, ποιότητας και φαινολογικών αρχείων, οι τρεις μεγάλες κατηγορίες δεδομένων καλλιέργειας για πρόγνωση, αναλύονται περισσότερο στη συνέχεια.

**4.1.2.2 Απόδοση.** Η απόδοση μιας καλλιέργειας μπορεί να εκφραστεί με πολλούς τρόπους. Μπορεί να μετρηθεί με το βάρος το μέγεθος, τον αριθμό και με άλλους τρόπους. Κάθε μέτρηση μπορεί να εκφραστεί με τρόπο απόλυτο π.χ. Kgr/στρ. Εκφράσεις αυτού του τύπου εξάγονται με τη βοήθεια του «Μέσου όρου». Άλλοι στατιστικά μεγέθη της παραμετρικής στατιστικής, όπως ο μέσος και ο διάμεσος θα έπρεπε να χρησιμοποιούνται επίσης διότι αποτελούν καλύτερες παραμέτρους από το μέσο όρο.

Δυστυχώς, ο μέσος όρος σαν έννοια έχει ευρεία αποδοχή. Χάριν ευκολίας ο μέσος όρος χρησιμοποιείται σαν παράδειγμα και ο αναγνώστης μπορεί να χρησιμοποιήσει άλλα στατιστικά μεγέθη, αν αυτό χρειαστεί. Στατιστικά μεγέθη όπως η μέση απόκλιση, η τυπική απόκλιση και ο συντελεστής παραλλακτικότητας, μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν.

**4.1.2.3 Ποιότητα.** Η ποιότητα μιας καλλιέργειας μπορεί να προσδιοριστεί σαν αξία των οικονομικώς εκμεταλλεύσιμων μερών ή οργάνων της εν λόγω καλλιέργειας. Έχει εκφραστεί με πολλούς τρόπους όπως χρώμα, μυρωδιά, γεύση, σκληρότητα και μέγεθος. Η ποιότητα δεν έχει διευκρινιστεί όσο ξεκάθαρα έχει διευκρινιστεί η απόδοση, αλλά συνήθως χρησιμοποιείται κατά μια ποσοτική έννοια. Έτσι, προσπάθεια θα πρέπει να γίνει για την ανεύρεση ποσοτικών δεικτών της ποιότητας μιας καλλιέργειας.

Η ποιότητα μιας καλλιέργειας έχει καταγραφεί μερικές φορές σε εμπορικά δεδομένα. Αυτές οι καταγραφές μπορούν να χρησιμοποιηθούν μόνο σαν αναφορές γιατί παρόλο που είναι σημαντικές, θεωρούνται ελλιπείς.

Το εμπορικό σύστημα ταξινόμησης μπορεί να είναι μια ακόμη έκφραση της ποιότητας μιας καλλιέργειας. Μπορεί να αποτελέσει μια σημαντική ποσοτική περιγραφή αλλά μερικές φορές μπορεί να είναι μικρής σημασίας σε θέματα που αφορούν την αύξηση και την ανάπτυξη φυτών. Για παράδειγμα « Ντομάτα Κατηγορίας Α' » περιλαμβάνει ντομάτες με 90% ομοιόμορφο χρωματισμό επιφανείας, ενώ χαρακτηριστικά που σχετίζονται με «τραυματισμούς και ασθένειες» μικρή σημασία έχουν να κάνουν με τη ποιότητα, όσον αφορά στην αγρομετεωρολογική αντιμετώπιση.



Επίσης η περιεχόμενη υγρασία και η μυρωδιά είναι χρήσιμα στάνταρ κατάταξης για τους αγρομετεωρολόγους, ενώ η παρουσία ξένων υλών ή το ποσοστό των καταστραμμένων σπόρων δεν μπορεί να θεωρηθεί το ίδιο χρήσιμη.

**4.1.2.4 Φαινολογικά χαρακτηριστικά.** Όπως έχει ήδη αναφερθεί, η μέτρηση φαινολογικών χαρακτηριστικών με όργανα μέτρησης είναι ό,τι πιο ενδεδειγμένο. Σχεδόν όλα τα υπάρχοντα φαινολογικά δεδομένα έχουν καταγραφεί μετά από οπτικές παρατηρήσεις. Όταν γίνεται αναφορά σε μια καλλιέργεια αγρού, χρησιμοποιούνται συνήθως εκφράσεις ποσοστών επί του συνόλου της καλλιέργειας. Για παράδειγμα 75% άνθιση φασολιών ή 80% φυτρωτικότητα χειμερινού σιταριού. Οι ημερομηνίες συγκομιδής μετρούνται με όλους τους τύπους υποκειμενικών μέσων όρων και έτσι είναι ανεπαρκώς προσδιορισμένες για τις περισσότερες καλλιέργειες και σίγουρα δεν είναι αντικειμενικές.

Η καταγραφή των δεδομένων πρέπει να είναι αρκετά εκτενής, έτσι ώστε να εξασφαλίζεται μια σταθερότητα. Ο όρος σταθερότητα υποδηλώνει πως δεν θα υπάρξει αλλαγή στη μέση αξία των δεδομένων, αν περισσότερα από αυτά προστεθούν. Η σταθερότητα αυτή είναι εφαρμόσιμη και σε περιβαλλοντικά δεδομένα και σε δεδομένα καλλιέργειας αν και αυτά μπορεί να επηρεάζονται από διαφορετικούς παράγοντες.

Τα δεδομένα καλλιέργειας μπορεί να αντανakλούν διαφορές μέσα σε ποικιλίες, διαφορές σε καλλιεργητικές πρακτικές καθώς επίσης και διαφορές ανάμεσα σε περιοχές. Στην πραγματικότητα οι καλλιεργητικές πρακτικές μπορεί να έχουν μεγαλύτερη επίδραση στην παραγωγή από τις αλλαγές του περιβάλλοντος. Αυτά τα γεγονότα καθιστούν αδύνατη την υιοθέτηση ενός ενιαίου τύπου καταγραφής για κάθε καλλιέργεια.

Για μια συγκεκριμένη καλλιέργεια κάτω από την ίδια καλλιεργητική πρακτική, όσο μεγαλύτερο το μέγεθος των καταγεγραμμένων δεδομένων, τόσο μεγαλύτερη η αξιοπιστία τους. Συνήθως μεγάλες καταγραφές δεδομένων είναι διαθέσιμες μόνο για στοιχεία αποδόσεων και όχι για ποιοτικά και φαινολογικά χαρακτηριστικά. Σε λίγες περιπτώσεις, μπορεί να υπάρχουν μακρείς κατάλογοι με δεδομένα αποδόσεων 50 χρόνων ή και περισσότερο, αλλά και πάλι δεν είναι χρήσιμοι αν δεν περιλαμβάνουν φαινολογικές πληροφορίες όπως ημερομηνίες άνθισης, φύτευσης, συγκομιδής κ.τ.λ.

Από την άλλη μεριά, μερικές δημοσιευμένες εργασίες που ασχολούνται με σχέσεις μεταξύ καλλιέργειας και περιβάλλοντος έχουν χρησιμοποιήσει δεδομένα μόνο 2 με 5 χρόνων. Τα δεδομένα αυτά δεν θα μπορούσαν να έχουν χειριστεί ικανοποιητικά αν δεν υπήρχαν τουλάχιστον 9 μετρήσεις ή παρατηρήσεις κατά τη διάρκεια των χρόνων αυτών.

Από τη στιγμή που τα δεδομένα μιας καλλιέργειας ταξινομήθηκαν σωστά, πρέπει να παρουσιαστούν με τέτοιο τρόπο ώστε να γίνει δυνατή και αποτελεσματική η περαιτέρω χρήση τους. Η πληρότητα και ακρίβεια των δεδομένων καλλιέργειας είναι ύψιστης σημασίας αφού πάνω σε αυτά στηρίζονται οι αγρομετεωρολογικές μελέτες και ιδιαίτερα αυτές της πρόβλεψης.

Ιδανικά δεδομένα θα μπορούσαν να θεωρηθούν αυτά που περιλαμβάνουν πλήρη αρχεία φαινολογικών χαρακτηριστικών και ακριβείς μετρήσεις μορφολογικών και χημικών χαρακτηριστικών. Τα περισσότερα δεδομένα, εμπορικά, ιστορικά, από πανεπιστήμια ή ιδιωτικές βιομηχανίες συνήθως υστερούν ως προς αυτά τα στάνταρ. Πιο συγκεκριμένα, έχουν



δημοσιευθεί δεδομένα καλλιεργειών με μόνο ένα στατιστικό μέγεθος, την απόδοση ανά εκτάριο. Τέτοια δεδομένα δεν είναι χρήσιμα όσον αφορά σε αγρομετεωρολογικές μελέτες. Μια καλή παρουσίαση εξαρτάται από την ώρα της παρατήρησης και την ικανότητα του παρατηρητή.

Για πρόβλεψη καλλιέργειας, η ακρίβεια των προβλεπόμενων αποδόσεων, της ποιότητας και της ημερομηνίας ωρίμανσης, θα πρέπει να μελετηθούν. Από τη στιγμή που η απόδοση μιας καλλιέργειας έχει γενικότερο ενδιαφέρον θα χρησιμοποιηθεί στη συνέχεια σαν παράδειγμα:

$$Y_r = Y_a / Y_e \quad (4-1)$$

όπου:  $Y_a$ : η πραγματική απόδοση,  $Y_e$ : η εκτιμώμενη απόδοση και  $Y_r$ : η σχέση μεταξύ των δύο.

Η απόκλιση βάρους της πραγματικής απόδοσης από την εκτιμώμενη σε ποσοστά δίνεται από τον τύπο:

$$F = 100(Y_a - Y_e) / Y_a \quad (4-2)$$

Από τις (4-1) και (4-2) προκύπτει :

$$Y_r = 100 / (f - 100) \quad (4-3)$$

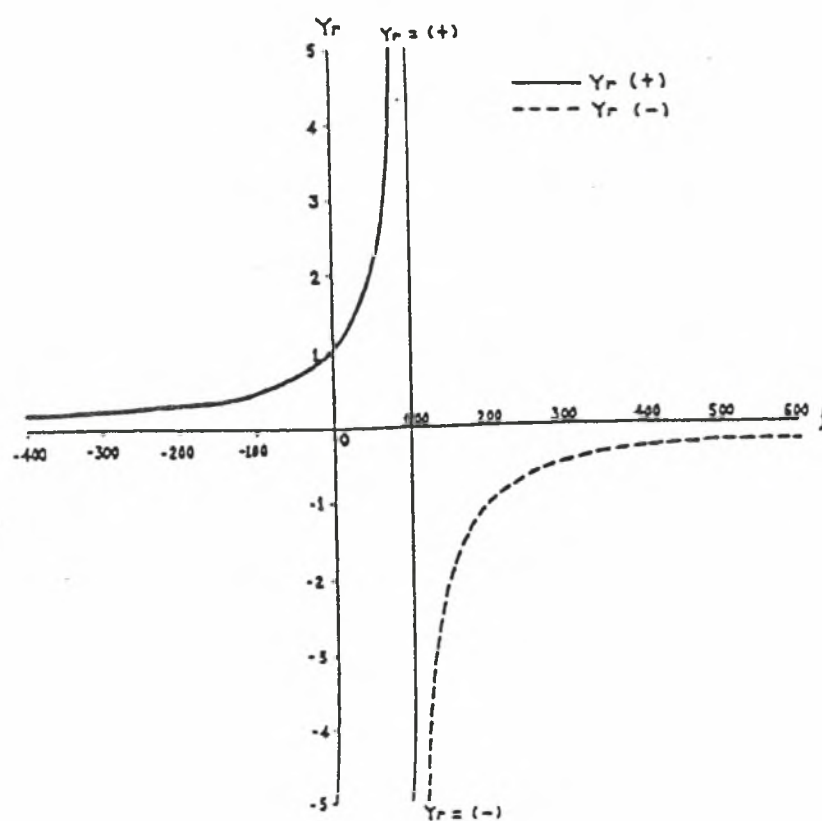
Σύμφωνα με την σχέση (4-3), τρεις κατηγορίες απόδοσης μπορούν να εξαχθούν με χρήση των παραμέτρων  $Y_r$  ή  $f$ .

- (α) Σύμφωνα με το  $Y_r$  όταν:  $Y_r = 1$  άριστη εκτίμηση  
 $0 < Y_r < 1$  υπερεκτίμηση  
 $Y_r > 1$  υποεκτίμηση

- (β) Σύμφωνα με το  $f$  όταν :  $f = 0$  άριστη εκτίμηση  
 $0 < f < 100$  υποεκτίμηση και  
 $f > 0$  υπερεκτίμηση.

Πλωτάροντας το  $f$  και το  $Y_r$  σε ένα σύστημα αξόνων εξάγεται το σχεδιάγραμμα του σχήματος 4.1. Η καμπύλη στο πρώτο και δεύτερο τεταρτημόριο συμβολίζει τη σημαντικότητα της εκτιμώμενης απόδοσης, ενώ η διακεκομμένη καμπύλη αποτελεί τη θεωρητική γραμμή η οποία ποτέ δεν παρουσιάζεται. Η τρίτη γραμμή του σχήματος (η παράλληλη στον άξονα των  $Y$ ) είναι ασυμπτωτική στις δύο καμπύλες. Η ακρίβεια της πρόβλεψης της απόδοσης της καλλιέργειας μπορεί εύκολα να εκτιμηθεί ανάλογα με τον προσανατολισμό της πρώτης καμπύλης.

Με τον όρο «τροποποίηση δεδομένων» καλούνται οι όποιες αλλαγές γίνονται, μέσα σε μια χρονιά ή ένα γκρουπ ετών για να μειωθεί η σημασία κάποιου παράγοντα, εκτός από αυτούς του περιβάλλοντος, ο οποίος θα μπορούσε να προκαλέσει αλλαγή των δεδομένων, μέσα σε αυτό το χρονικό διάστημα. Η διαδικασία αυτή, η οποία είναι απολύτως απαραίτητη για να υπάρξουν δεδομένα αντιπροσωπευτικά για μεγάλη σειρά καταγραφών, μπορεί να ονομαστεί «διόρθωση δεδομένων». Όλα τα δεδομένα δε θα έπρεπε να διορθωθούν πριν από τη στατιστική επεξεργασία, αλλά αυτό κρίνεται απαραίτητο κάτω από κάποιες συνθήκες. Ανεπιθύμητοι περιβαλλοντικοί παράγοντες μπορούν επίσης να εξαλειφθούν με τη μέθοδο αυτή, για παράδειγμα δεδομένα καλλιέργειας που έχουν επηρεαστεί από σημαντική ζημιά λόγω παγετού, ανέμου, ή χαλαζιού.



Σχήμα 4.1 Σχεδιάγραμμα πρόγνωσης παραγωγής.

Υπάρχουν διάφορες μέθοδοι δια διόρθωση δεδομένων. Οι μέθοδοι αυτοί μπορούν να εφαρμοστούν σε δεδομένα καλλιεργειών εκτός από την απόδοση. Αφού τα δεδομένα έχουν διορθωθεί, στατιστική επεξεργασία λαμβάνει χώρα για να βρεθούν τάσεις και παραλλακτικότητες. Ο υπολογισμός βασικών στατιστικών όπως ο μέσος όρος, οι αποκλίσεις, οι διάμεσοι είναι χρήσιμοι για ελαχιστοποίηση της παραλλακτικότητας μέσα στις ποικιλίες, τις περιοχές και το χρόνο.

Όταν παράγοντες τους μικροπεριβάλλοντος οι οποίοι επηρεάζουν τα δεδομένα της καλλιέργειας δεν είναι διαθέσιμοι, τα στατιστικά των κεντρικών τάσεων θα πρέπει πάλι να εφαρμόζονται. Το γεγονός αυτό καθιστά δυνατό τον έλεγχο των δεδομένων καλλιέργειας στη δεδομένη περιοχή από τους περιβαλλοντικούς παράγοντες της εν λόγω περιοχής.

Η μέθοδος αυτή, η οποία τείνει να αφήσει απ' έξω τις μικροκλιματικές επιδράσεις, έχει αποδειχθεί πολύ χρήσιμη. Επιπλέον, όταν φαινολογικά στάδια δύο εντελώς διαφορετικών σετ δεδομένων είναι παρόμοια στις ίδιες ημερομηνίες, η κεντρική αξία θα πρέπει να χρησιμοποιείται. Η σπορά και η άνθιση για παράδειγμα, φυτών μπιζελιού στο χωράφι Α μπορεί να είναι παρόμοια με την σπορά και την άνθιση σε ένα γειτονικό χωράφι Β, αλλά η απόδοση του πρώτου να είναι υψηλότερη του δεύτερου.

Οι ποικιλότητες των δεδομένων καλλιέργειας, από την άλλη μεριά, θα πρέπει να υπολογιστούν για να βρεθούν οι σχέσεις μεταξύ των μεταβλητών. Η τυπική απόκλιση και ο συντελεστής παραλλακτικότητας είναι δύο από τα βασικότερα στατιστικά μεγέθη.

## 4.2 Μέθοδοι συστηματοποίησης

Μέχρι το σημείο αυτό έχουν εξεταστεί οι βασικές έννοιες της αγρομετεωρολογίας, οι βασικοί μαθηματικοί και στατιστικοί υπολογισμοί, και η πρώτη προσέγγιση των σχέσεων καλλιέργειας-περιβάλλοντος με βάση την φαινολογική, μετεωρολογική και φαινομετεωρολογική προσέγγιση. Οι περισσότερες από αυτές τις προσεγγίσεις αφορούσαν έναν μόνο σημαντικό παράγοντα (όπως η θερμοκρασία ή η βροχόπτωση), και για συγκεκριμένο αυξητικό στάδιο. Έτσι, η επιτυχία μιας τέτοιας προσέγγισης εξαρτάται από

- (α) την επιλογή των πιο αντιπροσωπευτικών μικροκλιματικών στοιχείων του εξεταζόμενου αγρού,
- (β) την επιλογή του περισσότερο σημαντικού στοιχείου ή των περισσότερο σημαντικών στοιχείων για κάθε στάδιο της ανάπτυξης,
- (γ) την ενοποίηση του φυσικού περιβάλλοντος σύμφωνα με τις αρχές της φυσιολογίας και τους φυσικούς νόμους, και
- (δ) το συνδυασμό των βιολογικών αντιδράσεων του φυσικού περιβάλλοντος.

Είναι σημαντικό να επιλεγεί το κατάλληλο ή τα κατάλληλα στοιχεία του περιβάλλοντος, τα οποία θα είναι αντιπροσωπευτικά της τοποθεσίας. Για παράδειγμα, σε μία έκταση 5 τετραγωνικών μιλίων, το πιθανό ποσοστό ηλιοφάνειας, οι βροχοπτώσεις κατά τη διάρκεια του χειμώνα και της άνοιξης, και η ένταση, η διάρκεια και η ποιότητα του φωτός είναι περισσότερο αντιπροσωπευτικά στοιχεία από τη θερμοκρασία και την υγρασία.

Ωστόσο, αυτά τα αντιπροσωπευτικά στοιχεία του μικροπεριβάλλοντος μπορεί να μην είναι πάντα τα περισσότερα σημαντικά στοιχεία. Για παράδειγμα, το ύψος της βροχής αποτελεί σημαντικό στοιχείο πριν και κατά τη διάρκεια του σταδίου tasseling του καλαμποκιού. Όμως, αυτό το φαινολογικό στάδιο παρατηρείται συνήθως καλοκαίρι για τις περισσότερες ζώνες καλλιέργειας καλαμποκιού στις ΗΠΑ. Εφόσον οι καλοκαιρινές βροχές είναι μάλλον σποραδικές, η συλλογή δεδομένων για μία έκταση 5 τετραγωνικών μιλίων δεν θα αντιπροσωπεύει την πραγματική κατανομή των βροχοπτώσεων, και άρα η μέτρηση θα αποτελεί σημειακό δεδομένο. Επομένως, χρειάζονται οπωσδήποτε όργανα τα οποία θα κάνουν μετρήσεις σε μεγάλες περιοχές.

Μία άλλη βελτίωση της προσέγγισης που εξετάζει ένα μόνο στοιχείο είναι η ενοποίηση διαφόρων περιβαλλοντικών παραγόντων. Δυστυχώς, δεν έχει εφευρεθεί κάποιος ενοποιητής του κλίματος, και συνήθως παρατηρείται το κλίμα για τα φυσικά του στοιχεία. Επομένως, η ενοποίηση του φυσικού περιβάλλοντος μπορεί να γίνει μόνο με στατιστικά μέσα. Κάποια παραδείγματα της ενοποίησης του φυσικού περιβάλλοντος δόθηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο. Θα πρέπει, ωστόσο, να συνεχιστεί η έρευνα για την καθιέρωση συνδυαστικών περιβαλλοντικών παραμέτρων.

Επίσης άλλη βελτίωση που μπορεί να γίνει είναι ο συνδυασμός των βιολογικών αντιδράσεων. Εφόσον το φυσικό περιβάλλον έχει αναπαρασταθεί με τη χρήση μεμονωμένων περιβαλλοντικών παραγόντων, θα πρέπει να συνδυαστούν οι επιδράσεις αυτών των μεμονωμένων παραμέτρων στην αύξηση και την ανάπτυξη του φυτού. Για παράδειγμα, σε ορισμένα στάδια της αύξησης του φυτού είναι σημαντικό το ύψος της βροχής, καθώς και η θερμοκρασία κατά τη διάρκεια της νύκτας. Επομένως, θα πρέπει να μελετηθεί η συνδυασμένη επίδρασή τους στα φυτά.

Ο Οbukhon (1949) συνόψισε αποτελέσματα έρευνας πηγαίνοντας πίσω στην αρχή του αιώνα. Για να ερευνήσει τις επιδράσεις του καιρού στην παραγωγή χειμερινής σίκαλης σε ξηρές περιοχές κοντά στο Βόλγα, έπρεπε πρώτα να διαχωρίσει την συμβολή των φθινοπωρινών-χειμερινών και ανοιξιάτικων-καλοκαιρινών περιόδων. Στο τέλος γράφτηκε μια ανασκόπηση συνδυάζοντας παραγωγές με οπτικές εκτιμήσεις της κατάστασης της χειμερινής σίκαλης. Η εξίσωση μπορεί να υπολογίσει το χρόνο που οι σειρές παραγωγής των προϊόντων καθορίζονται από φθινοπωρινές και χειμερινές επιδράσεις.

Η ανοιξιάτικη και καλοκαιρινή περίοδος ανάπτυξης των φυτών χωρίζεται σε 9 υποπεριόδους και ο υπολογισμός περιλαμβάνει τους συντελεστές συσχέτισης μεταξύ των καθορισμένων σειρών παραγωγής των φυτών (στάδια ανάπτυξης) και των μετεωρολογικών παραγόντων (πιν. 4-1).

Το ερώτημα που ίσως τίθεται είναι πώς υπολογίζονται οι ολικές επιδράσεις της θερμοκρασίας και της βροχόπτωσης και για τα 9 στάδια της ανοιξιάτικης-καλοκαιρινής ανάπτυξης. Είναι φανερό ότι σε τέτοια περίπτωση το απλό άθροισμα των μετεωρολογικών παραμέτρων δεν θα ήταν πρακτικό και αξιόπιστη εξίσωση παλινδρόμησης δεν θα μπορούσε να γραφτεί χρησιμοποιώντας 19 ανεξάρτητες μεταβλητές για 23 παρατηρήσεις.

Ο Οbukhon πρότεινε μια αποτελεσματική αν και όχι καλύτερη προσέγγιση.



**Πίνακας 4.1** Συντελεστές συσχέτισης μεταξύ μεμονωμένων εκτιμήσεων παραγωγής και μετεωρολογικών παραγόντων.

Στάδιο ανάπτυξης	Βροχόπτωση ( συνολ. mm )	Μέση Θερμοκρασία ( <sup>0</sup> C)
1. Έναρξη της ανάπτυξης	0,02	0,39
2. Ακμαία ανάπτυξη	0,18	0,20
3. -//-	0,54	-0,28
4. Παραγωγή μίσχου ( καλάμωμα )	0,81	-0,53
5. -//-	0,55	-0,58
6. Ξεστάχιασμα	0,26	-0,10
7. Ανθιση	0,36	-0,41
8. Γέμισμα του << σπυριού >>	0,19	-0,34
9. Ωρίμανση	0,04	-0,34

Τα βάρη αποδόθηκαν στις θερμοκρασίες και στη βροχόπτωση κάθε υποπεριόδου σε αναλογία με το τετράγωνο του συντελεστή συσχέτισης μεταξύ του υπολογισμού της παραγωγής και θερμοκρασίας σε σταθερή βροχόπτωση και μεταξύ παραγωγής και βροχόπτωσης σε σταθερή θερμοκρασία. Το αποτέλεσμα ήταν οι 18 δείκτες να αντικατασταθούν από 3.

Μια ειδική αναφορά της πολυδιάστασης του προβλήματος παρουσιάστηκε από τον Shirotenko (1969). Η ανταπόκριση του φυτού σε υδρομετεωρολογικούς παράγοντες που είναι τυχαίες συναρτήσεις του χρόνου υφίσταται μια κανονική διακύμανση κατά τη διάρκεια της οντογένεσης του φυτού, της οποίας ο μέσος χρόνος υπολογίζεται σε 100 ημέρες. Πόσοι όμως υδρομετεωρολογικοί παράγοντες πρέπει να υπολογιστούν; Τουλάχιστον τρεις: θερμοκρασία αέρα, δείκτης υγρασίας και ηλιακή ακτινοβολία.

Έτσι η λύση του προβλήματος είναι μια γραμμική προσέγγιση (χωρίς τη θεώρηση αλληλεπίδρασης και συσσωρευτικής επίδρασης των περιβαλλοντικών παραγόντων) παλινδρόμησης περιέχοντας 200 με 300 συντελεστές που πρέπει να διερευνηθούν. Αυτό είναι πρακτικά αδύνατο, επειδή τα πειράματα ανταπόκρισης στο χωράφι έπρεπε να διαρκούν χιλιάδες χρόνια. Όπως θα φανεί παρακάτω, αυτό το πρόβλημα μπορεί να λυθεί με ικανοποιητικό τρόπο με μια δυναμική προσέγγιση. Τότε ο αριθμός των συντελεστών που θα έπρεπε να υπολογιστούν δε θα υπερέβαινε τους 5 με 10.

Αν και εμπειρικές - στατιστικές προσεγγίσεις δεν είναι τόσο αποτελεσματικές, πρέπει να χρησιμοποιούνται για να βοηθούν στο δύσκολο πρόβλημα της πολυπλοκότητας. Ας θεωρηθεί κάθε μετεωρολογική παράμετρος  $X$  κατά τη διάρκεια της περιόδου ανάπτυξης σαν διακριτική λειτουργία του χρόνου  $X_j$  όπου  $j=1,2,3,\dots,n$  σε ισαπέχοντα σημεία ( όπου  $n$  ο

αριθμός ημερών σε 10-ήμερες ή άλλες χρονικές περιόδους που αποτελείται η περίοδος ανάπτυξης των φυτών.

Ο Zabelin παρουσίασε μια ενδιαφέρουσα απεικόνιση αυτής της ιδέας (1990). Για την πρόγνωση παραγωγής δημητριακών  $y$  στο Καζακστάν, επιλέχθηκαν παράγοντες όπως η ολική βροχόπτωση και οι μέσες θερμοκρασίες για την τρίτη 10-ήμερη περίοδο του Μαΐου και τις τρεις 10-ήμερες περιόδους του Ιουνίου ( $R_1, R_2, R_3, R_4$  και  $t_1, t_2, t_3, t_4$  αντίστοιχα).

Με τη μέθοδο ελαχίστων τετραγώνων μια εξίσωση παλινδρόμησης δημιουργήθηκε:

$$y = -0,10 R_1 - 0,91 R_2 + 1,294 R_3 + 0,5 R_4 + 0,559 t_1 - 0,904 t_2 + 1,38 t_3 - 0,508 t_4. \quad (4-4)$$

Στην εξίσωση (4-4) όλοι οι παράγοντες παρουσιάστηκαν σε στανταρισμένη κλίμακα. Κάτω από συνθήκες ανεπαρκούς υγρασίας οι παράγοντες βροχόπτωσης θα έπρεπε να είναι όχι αρνητικοί και οι παράγοντες θερμοκρασίας όχι θετικοί.

Στην εξίσωση αυτή οι συνθήκες αυτές παραβιαζόταν, εξαιτίας της στενής γραμμικής σχέσης μεταξύ των συντελεστών. Για την απόκτηση αποδεκτών αποτελεσμάτων χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος παλινδρόμησης κορυφογραμμής. Στην μικρότερη τιμή της παραμέτρου κορυφογραμμής  $K=0,3$  δημιουργήθηκε η ακόλουθη σχέση :

$$y = 0,04 R_1 + 0,070 R_2 + 0,038 R_3 + 0,288 R_4 - 0,036 t_1 - 0,044 t_2 - 0,249 t_3 - 0,015 t_4. \quad (4-5)$$

Η διαφορά μεταξύ των εξισώσεων (4-4) και (4-5) πρέπει να τονιστεί: Όταν και οι δύο σχέσεις ελέγχονταν για ανεξάρτητα δεδομένα για 4  $y$ , τα σφάλματα με την εξίσωση (4-5) ήταν τα μισά σε σχέση με την (4-4). Η επιλογή ενός μη γραμμικού μοντέλου θα έπρεπε να είναι το επόμενο βήμα στον πληρέστερο τρόπο χρήσης των προηγούμενων δεδομένων.

Ο Satyr (1973) περιέγραψε τη σχέση μεταξύ θερμοκρασίας αέρα, υγρασίας εδάφους και παραγωγή βιομάζας σαν έναν ασύμμετρο "λόφο" του οποίου η κορυφή τέμνει το σημείο που παρουσιάζει τον καλύτερο συνδυασμό των παραπάνω παραγόντων.

Ο Dmitrenko (1976) πρότεινε το ευρύτερα γνωστό στατιστικό μοντέλο. Σχεδιάστηκε για τον υπολογισμό και πρόγνωση της παραγωγής χειμερινού σιταριού και σίκαλης, ανοιξιότικου κριθαριού, καλαμποκιού, πατάτας, τεύτλων και ηλίανθου. Ένας τύπος χρησιμοποιήθηκε για να εκφράσει τη σχέση μεταξύ χειμερινών σιτηρών και επίδρασης παραγόντων :

$$y = Y_j (1-P) f(k) n_8(W) a_8 + \sum_{i=1}^n n_i(T_i) n_i^*(R_i) a_i \quad (4-6)$$

όπου  $Y$  είναι η ετήσια στατιστική μέγιστη παραγωγή,

$P$  είναι η πυκνότητα των φυτών,

$f(k)$  ο καλλιεργητικός δείκτης,

$n_i(T)$ ,  $n_i^*(R)$  και  $n_g(W)$  είναι οι συναρτήσεις παραγωγής των φυτών για θερμοκρασία αέρα  $T$ , βροχόπτωση  $R$  και αποθήκευση νερού  $W$  στην αρχή της αύξησης των φυτών, ενώ

$i$  είναι ο αριθμός των υποπεριοδών της αύξησης.

Αυτές οι συναρτήσεις είναι καλά διαμορφωμένες και μπορούν να ποικίλουν από 0 μέχρι 1.

Σύμφωνα με τα παραπάνω, οι σχέσεις φυτών-περιβάλλοντος θα πρέπει πρώτα να αναλυθούν, στη συνέχεια να συντεθούν και τέλος να τυποποιηθούν. Με την τυποποίηση εννοούμε την συστηματοποίηση των σχέσεων φυτών-περιβάλλοντος ακολουθώντας τη χρονική σειρά της φυσιολογικής ανάπτυξης των φυτών και τη χρονική ακολουθία του φυσικού περιβάλλοντος. Η ανάλυση, η σύνθεση και η τυποποίηση είναι οι τρεις βασικές διαδικασίες που περιλαμβάνει η έρευνα φυτών-περιβάλλοντος. Από αυτές, η σύνθεση είναι η πιο σημαντική, και αυτή που θα εξετασθεί διεξοδικά.

### 4.3 Ανάλυση

Η ανάλυση είναι το πρώτο βήμα στη μεθοδολογία και χρησιμεύει στην έρευνα και ερμηνεία των σχέσεων μεταξύ φυτών και περιβάλλοντος μέσω του κατακερματισμού του περιβάλλοντος στις κατάλληλες φυσικές μονάδες σεβόμενοι τα φαινολογικά στάδια των αντιδράσεων του φυτού και τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά της ποικιλίας.

Οι φυσικές μονάδες μπορούν να είναι η θερμότητα, η υγρασία, το φως και το διοξείδιο του άνθρακα. Τα φαινολογικά στάδια διακρίνονται στο στάδιο δένδρουλλίου, στο στάδιο της αρχικής φυτικής αύξησης, στο στάδιο ταχείας αύξησης και στα αναπαραγωγικά στάδια. Αυτή η διαδικασία είναι ανάλογη με την ποσοτική ανάλυση στη χημεία, όπου διαχωρίζεται μια χημική ένωση στα συστατικά της.

Η αντίστροφη διαδικασία είναι η σύνθεση, όπου δύο ή περισσότερα χημικά στοιχεία συνδυάζονται για να σχηματίσουν μία ένωση. Το κλίμα, ή ο καιρός στο σύνολό του, μπορούν να παρομοιαστούν με μία χημική ένωση, ενώ οι κλιματικοί παράγοντες μπορούν να παρομοιαστούν με τα χημικά στοιχεία. Δηλαδή, η ανάλυση και η σύνθεση είναι δύο αλληλένδετες διαδικασίες που χρησιμοποιούνται πάντα η μία μετά την άλλη για τη διαπίστωση λογικών και αξιόπιστων σχέσεων μεταξύ των φυτών και του περιβάλλοντός τους.

Υπάρχουν τρία βήματα απαραίτητα στη διαδικασία της ανάλυσης

- (1) ανάλυση ιστορικών δεδομένων,
- (2) ανάλυση σύγχρονων δεδομένων και
- (3) πρόγνωση της πιθανότητας να συμβεί το υπό μελέτη γεγονός.

Ο κυριότερος στόχος του πρώτου βήματος είναι η ανακάλυψη ποσοτικών επιδράσεων του περιβάλλοντος στη καλλιέργεια από προηγούμενες καταγραφές. Τόσο το «μακρινό» παρελθόν, όσο και το πιο «πρόσφατο» πρέπει να αναλύονται με σεβασμό στη συγκεκριμένη καλλιέργεια στη συγκεκριμένη περιοχή.

Μια μακρινή καταγραφή δεδομένων μιας καλλιέργειας μπορεί να θεωρηθεί ένα χρονικό διάστημα 5 ετών ή και περισσότερο με προϋπόθεση να περιλαμβάνει 2 ή 3 τουλάχιστον καλλιεργητικές περιόδους στην ίδια περιοχή. Φυσικά όσο πιο μεγάλη ή χρονική αυτή περίοδος τόσο το καλύτερο.

Το περιβάλλον εξαρτάται από τους τύπους των στοιχείων, την εποχή του έτους και τη γεωγραφική τοποθεσία. Η καλλιέργεια και τα δεδομένα περιβάλλοντος πρέπει να καλύπτουν την ίδια χρονική περίοδο που πραγματοποιούνται τα πειράματα, αλλά αυτό δεν είναι πάντοτε αναγκαίο στις

περιπτώσεις πρόγνωσης παραγωγής. Το πιο «πρόσφατο» παρελθόν αναφέρεται στο στάδιο της αύξησης και ανάπτυξης της καλλιέργειας πριν την πρόβλεψη.

Όταν γίνεται πρόβλεψη για ένα ετήσιο φυτό, το στάδιο φυτρώματος θεωρείται «πρόσφατο» παρελθόν, αν η πρόγνωση έγινε για το βλαστικό στάδιο. Το «πρόσφατο» αυτό παρελθόν έχει μεγαλύτερη σημασία από το «μακρινό», γιατί η φυσιολογικές συνθήκες που επικρατούν μπορεί να παίζουν το καθοριστικότερο παράγοντα. Πολλά πειράματα υπό έλεγχο έχουν δείξει πως οι περιβαλλοντικές επιδράσεις κατά τη διάρκεια του φυτρώματος παρουσιάζονται αργότερα, στην αναπαραγωγική φάση ή το στάδιο ωρίμανσης ενός φυτού.

Αναφέρθηκε πως το «πρόσφατο» παρελθόν είναι σημαντικότερο από το πιο «μακρινό», όσον αφορά τουλάχιστον σε ζητήματα ανάπτυξης. Στη περίπτωση όμως ζητημάτων αύξησης το «μακρινό» παρελθόν φαίνεται να παίζει σημαντικότερο ρόλο. Έτσι αυτός που κάνει μια πρόβλεψη πρέπει να είναι γνώστης με την ιστορία της καλλιέργειας στη συγκεκριμένη περιοχή και το περιβάλλον και ειδικότερα να γνωρίζει τις σχέσεις μεταξύ τους. Υπάρχουν διάφορες τεχνικές για να βρεθούν περιβαλλοντικές σχέσεις.

Από τη στιγμή που αυτό θα γίνει, πρέπει όλα τα πορίσματα να παρουσιαστούν με ισότητες, χάρτες, πίνακες. Αυτό θα καταστήσει την πρόβλεψη πιο ακριβή και έγκυρη. Ίσως η μισή επιτυχία στην πρόβλεψη καθορίζεται από την ακρίβεια αυτής της ανάλυσης. Τέλος εκτός από τα δεδομένα του «μακρινού» παρελθόντος και αυτά του πιο «κοντινού» πρέπει επίσης να αναλυθούν.

Για την ανάλυση σύγχρονων δεδομένων, οι παρακάτω προϋπόθεσης θα πρέπει να τηρούνται:

(α) τα δεδομένα πρέπει να ενημερώνονται για σταθμούς μακριά από τα κέντρα πρόβλεψης και ένα καλό σύστημα επικοινωνίας θα πρέπει να εγκατασταθεί

(β) τα δεδομένα θα πρέπει να επεξεργάζονται με ηλεκτρονικά συστήματα υπολογιστών, εκτός και αν αναφερόμαστε μόνο σε ένα σταθμός πρόβλεψης

(γ) τα δεδομένα θα πρέπει να πλωταριστούν σε διάφορους χάρτες, πίνακες κ.τ.λ. καθώς επίσης και μαζί με σύμβολα καιρού σε τυπικούς επιφανειακούς χάρτες καιρού και τέλος

(δ) μια σχέση μεταξύ της παρούσης κατάστασης και της ιστορίας θα πρέπει να βρεθεί.

Διάφορες τεχνικές έχουν χρησιμοποιηθεί για να επιτευχθεί η τελευταία προϋπόθεση. Σε πολλές περιπτώσεις εμπειρικές φόρμουλες έχουν χρησιμοποιηθεί για να περιγράψουν μια «παρελθοντική» κατάσταση. Η εισαγωγή σύγχρονων δεδομένων σε τέτοιες φόρμουλες αποτελεί έναν ακόμη τρόπο πρόγνωσης. Οι φόρμουλες αυτές είναι συνήθως καλύτερες από τα γραφήματα, γιατί μπορούν να δημιουργηθούν με οποιοδήποτε αριθμό μεταβλητών και εμφανίζουν μεγαλύτερη ακρίβεια αποτελεσμάτων.

Τα τελευταία 30 χρόνια, ο Azzi (1956) επέδειξε την αντίδραση πολλών αγρονομικών καλλιεργειών (σιτηρά, φρούτα, λαχανικά) στις βροχοπτώσεις και τη θερμοκρασία, χρησιμοποιώντας το «μετεωρολογικό ισοδύναμο» (meteorological equivalent). Προσπάθησε να βρει ποσοτικές σχέσεις μεταξύ των μετεωρολογικών παραγόντων και της παραγωγής, δίνοντας έμφαση στα στάδια της ανάπτυξης.



Για παράδειγμα, η κρίσιμη τιμή (threshold value) της βροχόπτωσης σε συγκεκριμένο φαινολογικό στάδιο, η οποία ευθύνεται για την καλή ή όχι παραγωγή, ονομάζεται ισοδύναμο βροχόπτωσης. Επομένως, η ευθεία στο ορθογώνιο διάγραμμα που αντιπροσωπεύει αυτή την κρίσιμη τιμή ονομάζεται ευθεία ισοδυναμίας. Όταν η βροχή δρα ως περιοριστικός παράγοντας της παραγωγής, η ευθεία ισοδυναμίας αποτελεί την ευθεία ξηρασίας.

Ο γενικός όρος για το ισοδύναμο οποιουδήποτε κλιματικού στοιχείου ονομάζεται «μετεωρολογικό ισοδύναμο» ή «περιβαλλοντικό ισοδύναμο». Έχει βρεθεί ότι σε διαφορετικά αναπτυξιακά στάδια αυτά τα ισοδύναμα τείνουν να τέμνουν την παραγωγή της καλλιέργειας πολύ υψηλότερα ή χαμηλότερα από την κανονική παραγωγή στο διάγραμμα. Όλες οι περιοχές του διαγράμματος με υψηλή παραγωγή ονομάζονται «θετικές ζώνες»: όλες οι περιοχές με χαμηλή παραγωγή ονομάζονται «αρνητικές ζώνες». Οι περιοχές που παρουσιάζουν και υψηλή και χαμηλή παραγωγή ονομάζονται «μεικτές ζώνες».

Στο σχήμα 4.2 φαίνεται ένα από τα διαγράμματα αυτά του Azzi, το οποίο αφορά μία μελέτη των επιπτώσεων της βροχής στην παραγωγή σιταριού στην Ιταλία. Στο διάγραμμα αυτό, η τεταγμένη είναι το ύψος της βροχής σε χιλιοστά: η τετμημένη, τα διαφορετικά φαινολογικά στάδια των διαφόρων ετών. Οι μαύρες κουκκίδες αντιπροσωπεύουν τα έτη με παραγωγή πολύ υψηλότερη του κανονικού: οι λευκές κουκκίδες τα έτη με παραγωγή πολύ χαμηλότερη του κανονικού. Σύμφωνα με τα ευρήματά του σχετικά με τα ισοδύναμα της βροχόπτωσης, στις περισσότερες καλλιέργειες η βροχόπτωση είναι ωφέλιμη για την παραγωγή στο στάδιο της ταχείας αύξησης και επιβλαβής στο στάδιο του δενδρυλλίου.

Δεν είναι ωστόσο γνωστό αν αυτό ισχύει γενικά ή αν εξαρτάται από το βαθμό των ζημιών που έχει ήδη υποστεί το φυτό στο στάδιο του δενδρυλλίου, καθώς και από τις περιβαλλοντικές συνθήκες. Στην περίπτωση του sweet corn στο Green Bay (Σχήμα 3.6), η αρνητική επίδραση της βροχόπτωσης στην παραγωγή αντιστοιχούσε στην φάση μεταξύ της φύτευσης και του πρώτου tasseling. Η χαμηλή παραγωγή μπορεί να οφείλεται στη χαμηλή θερμοκρασία, καθώς οι πολλές βροχοπτώσεις κατά τη διάρκεια της άνοιξης στο Green Bay μπορεί κάλλιστα να συνδυάζονταν με υψηλή νέφωση και χαμηλές θερμοκρασίες.

Σε ένα από τα πειράματα του Azzi για την παραγωγή του καλαμποκιού, φάνηκε ότι μία ξηρασία στη διάρκεια του vegetative σταδίου είχε ως αποτέλεσμα πλάγιασμα και κακή συμπεριφορά, αλλά η παραγωγή δεν επηρεαζόταν καθόλου αν η παροχή νερού ήταν επαρκής κατά τη διάρκεια του σταδίου της ταχείας αύξησης.

Στις βόρειες πολιτείες των ΗΠΑ ορισμένες κονσερβοποιίες συνέκριναν την παραγωγή ντομάτας που προέρχονταν από διάφορες πηγές. Βρέθηκε ότι τα φυτά τα οποία αναπτύσσονταν σε γλάστρες στα τοπικά θερμοκήπια είχαν καλύτερη συμπεριφορά στον αγρό και υψηλότερη παραγωγή στην πρώιμη συγκομιδή, από ότι δενδρύλλια που προέρχονταν από τη Georgia. Ωστόσο, η συνολική παραγωγή των δεύτερων ξεπερνούσε πάντα αυτή των πρώτων, γιατί τα δενδρύλλια ανέπτυσαν καλύτερο ριζικό σύστημα μετά τη μεταφύτευση, και επεδείκνυαν μικρότερη κατανάλωση της αποθηκευμένης τροφής κατά το στάδιο της πρώιμης συγκομιδής.

Η χρονική ακολουθία των αντιδράσεων της καλλιέργειας θα πρέπει να ερευνηθεί σε βάθος σε συνάρτηση με τις επιδράσεις πολλαπλών

παραγόντων, πέρα από τις επιδράσεις μεμονωμένων παραγόντων. Ο Wang (1958, 1962β) σχεδίασε μία σειρά ταξινομητών για χρήση στις μελέτες αντιδράσεων των καλλιεργειών. Στο σχήμα 4.3 φαίνεται ένα διάγραμμα του ταξινομητή μεμονωμένων στοιχείου, ενώ στο σχήμα 4.4 φαίνεται η χρήση του ταξινομητή πολλαπλών στοιχείων.

Προφανώς, αν εφαρμοσθεί κάθε φορά ένας διαφορετικός ταξινομητής (που θα προέρχεται από μία σειρά ταξινομητών μεμονωμένων στοιχείων, όπου καθένας θα χρησιμοποιεί διαφορετική περιβαλλοντική παράμετρο ως τεταγμένη), η μεικτή ζώνη θα κατέληγε να εξαφανιστεί.

Συγκεκριμένα κάτι τέτοιο θα συνέβαινε αν οι περιβαλλοντικές παράμετροι πληρούσαν τα εξής κριτήρια:

(α) ήταν οι μοναδικοί καθοριστικοί παράγοντες της παραγωγής

(β) αρκούσαν για την κάλυψη όλων των πιθανών περιβαλλοντικών επιδράσεων

(γ) είχαν επιλεχθεί σωστά και

(δ) ήταν αξιόπιστες και αντιπροσωπευτικές του ολικού μικροπεριβάλλοντος.

Η επιλογή της κατάλληλης παραμέτρου για τον ταξινομητή είναι ιδιαίτερα σημαντική. Για παράδειγμα η καλλιέργεια-βροχερές ημέρες είναι καλύτερος ταξινομητής από τις βροχερές ημέρες, η σχετική μέγιστη και ελάχιστη βροχόπτωση είναι καλύτερες από την μηνιαία βροχόπτωση, ενώ η διημερήσια θερμοκρασία είναι πολύ πιο χρήσιμη από την μέση μηνιαία θερμοκρασία. Επίσης, όταν διατίθενται ακριβή δεδομένα για την υγρασία του εδάφους, είναι περιττά τα δεδομένα για τις βροχοπτώσεις και την εξάτμιση.

Αν πληρούνται όλα τα παραπάνω κριτήρια, τότε ο ταξινομητής θα ήταν σε θέση να δώσει απαντήσεις στα ακόλουθα ερωτήματα:

α) Πόσες περιβαλλοντικές παράμετροι εμπλέκονται, και ποιες είναι περισσότερο σημαντικές στατιστικά από τις υπόλοιπες;

β) Σε ποια σημαντική περίοδο εμπλέκεται η κάθε παράμετρος;

γ) Ποιες είναι οι τιμές των περιβαλλοντικών ισοδυνάμων;

δ) Πώς κατανέμονται τα σημεία σε κάθε ζώνη;

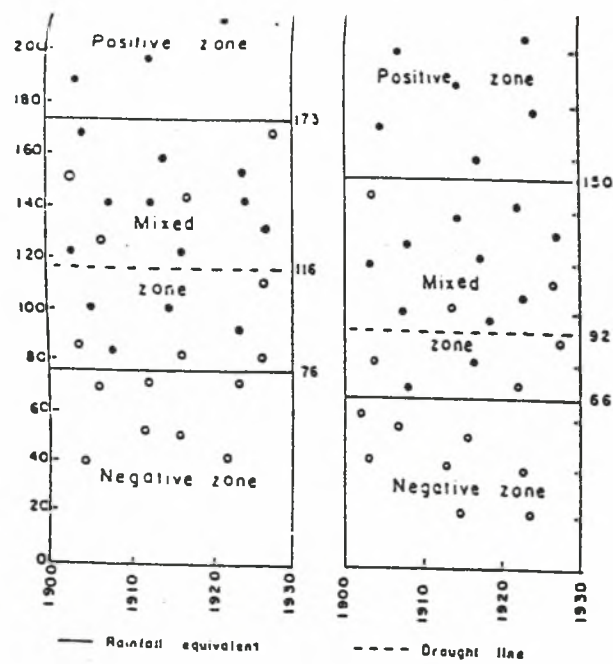
Τα περιβαλλοντικά ισοδύναμα καθορίζουν τα όρια των ζωνών και έτσι διακρίνεται η θετική, η αρνητική και η μεικτή ζώνη.

Όταν χρησιμοποιείται ως παράμετρος η ημερήσια μέση θερμοκρασία, η ανώτερη και η κατώτερη ευθεία ισοδυναμίας προσομοιάζουν στην ανώτερη και την κατώτερη ευθεία βέλτιστης παραγωγής, ή στις οριακές ευνοϊκές τιμές του θερμικού μοντέλου (σχήμα 4.3 και 4.4).

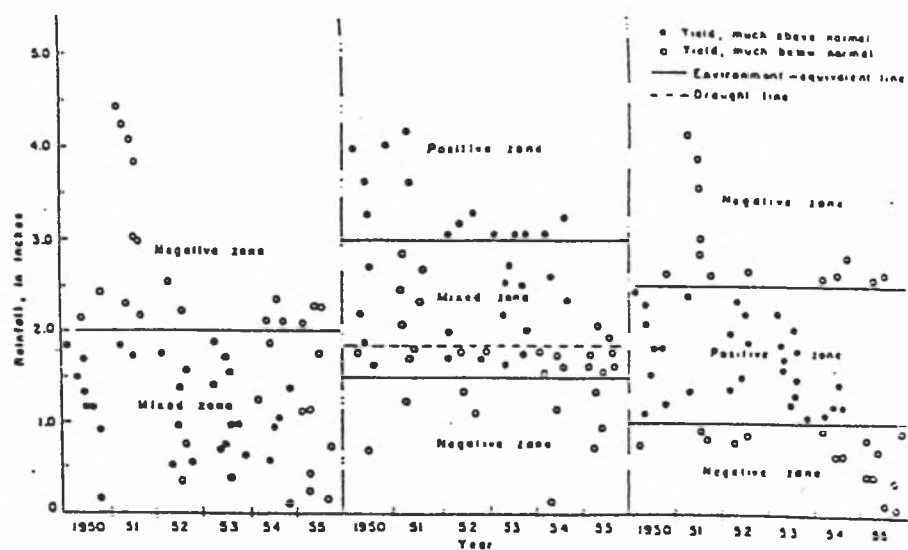
Όπως φαίνεται στο σχήμα 4.5, όταν χρησιμοποιείται η παράμετρος της σχετικής μέγιστης βροχόπτωσης για το αναπαραγωγικό στάδιο της ντομάτας, η ανώτερη και η κατώτερη ευθεία ισοδυναμίας προσομοιάζουν στα όρια της ευθείας βέλτιστης παραγωγής.

Αν χρησιμοποιηθεί η σχετική ελάχιστη θερμοκρασία, το κατώτερο όριο της θετικής ζώνης και το ανώτερο όριο της αρνητικής ζώνης ορίζουν την ευθεία ξηρασίας. Στην περίπτωση όμως αυτή η σειρά ταξινόμησης διαφόρων παραμέτρων αλλάζει, ενώ υπάρχουν και αλλαγές στις τιμές της ευθείας ισοδυναμίας, παρόλο που η σημαντικότητα των παραμέτρων παραμένει η ίδια.

Η ταξινόμηση μπορεί να γίνει από το μεγαλύτερο στο μικρότερο σύμφωνα με το βαθμό αντίδρασης στο περιβάλλον.

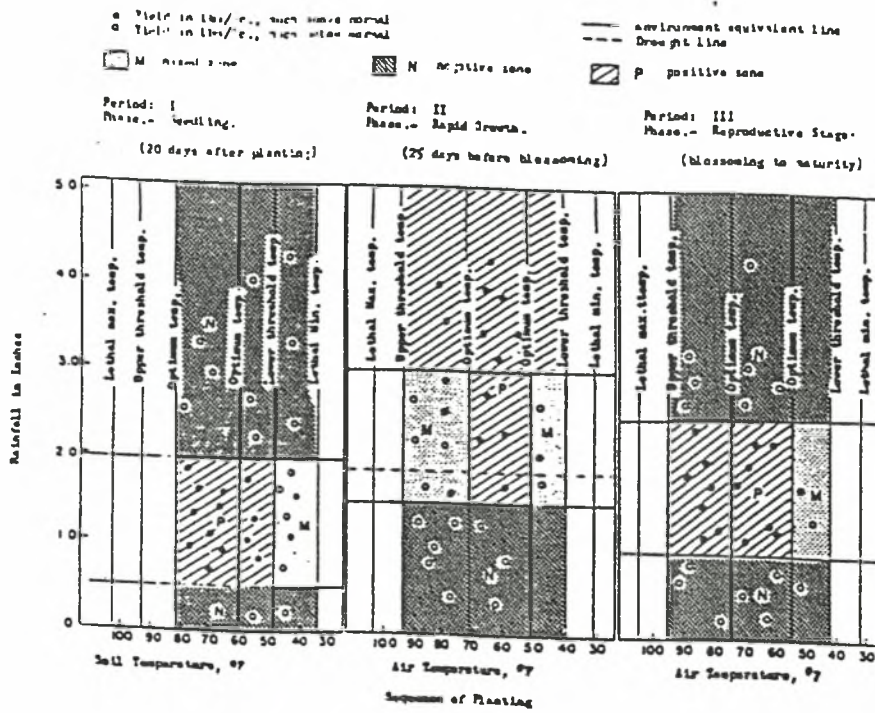


Σχήμα 4.2 Η μετεωρολογική αντιστοιχία του Azzi για τα σιτηρά



Σχήμα 4.3 Διάγραμμα του ταξινομητή μεμονωμένων στοιχείων





Σχήμα 4.4 Χρήση ταξινομητή πολλαπλών σχέσεων

Ο βαθμός αυτός μπορεί να καθοριστεί με μεθόδους πρώτης προσέγγισης, όπως περιγράφεται στο προηγούμενο κεφάλαιο.

Με λίγα λόγια, θα πρέπει να ταξινομείται πρώτα ή περισσότερο σημαντική (significant or important) παράμετρος για τις αντιδράσεις του φυτού. Όταν εφαρμόζεται ένας ταξινομητής πολλαπλών στοιχείων, οι αμφίδρομη σχέση μεταξύ δύο περιβαλλοντικών παραμέτρων είναι προφανέστατη. Όταν χρησιμοποιούνται ταξινομητές μεμονωμένων ή πολλαπλών στοιχείων, η στατιστική σημαντικότητα των ισοδυνάμων εξαρτάται από την κατανομή των σημείων στις διαφορετικές ζώνες. Στην πράξη, αντί για γραφικές παραστάσεις μπορεί να χρησιμοποιηθεί ο ηλεκτρονικός υπολογισμός ως εργαλείο ταξινόμησης.

Ανακεφαλαιώνοντας, το κύριο καθήκον ενός εργαλείου ταξινόμησης είναι να κατακερματίσει το περιβάλλον σε μεμονωμένα στοιχεία, ή να διαχωρίσει έναν πολλαπλό παράγοντα σε μεμονωμένους παράγοντες, σύμφωνα με τις σχέσεις περιβάλλοντος-καλλιέργειας. Αυτή είναι η διαδικασία της ανάλυσης και το αντίστροφο αποτελεί την διαδικασία της σύνθεσης.

#### 4.4 Σύνθεση

Με τον όρο σύνθεση εννοείται μία διαδικασία ή μέθοδος συνδυασμού των περιβαλλοντικών παραγόντων. Στη διαδικασία της σύνθεσης επεξεργάζονται παράλληλα και οι περιβαλλοντικές παράμετροι και τα φαινολογικά ενδεχόμενα. Ο κύριος στόχος της σύνθεσης είναι να κάνει την πρόβλεψη άψογη. Η ενοποίηση των περιβαλλοντικών παραγόντων και οι αμφίδρομες σχέσεις των φαινολογικών ενδεχομένων, περιγράφηκαν στο δεύτερο κεφάλαιο.

Κατά το συνδυασμό των παραγόντων συνήθως αντιμετωπίζονται τρία προβλήματα.

(α) Το πρόβλημα του συνδυασμού δύο ή περισσότερων τελείως διαφορετικών μονάδων, πχ. την πρόσθεση 2'' βροχής και θερμοκρασίας 87°F, τον πολλαπλασιασμό φωτός 567 ly/ημέρα με σχετική υγρασία 89% συν 5''/ημέρα εξατμισοδιαπνοή.

(β) το πρόβλημα του συνδυασμού δύο ή περισσότερων παραγόντων με διαφορετικό ειδικό βάρος όσον αφορά τις αντιδράσεις των φυτών και

(γ) το πρόβλημα της τελικής έκφρασης των συνδυασμένων παραγόντων κατά τέτοιο τρόπο ώστε να είναι δυνατή η συστηματοποίησή τους.

Με άλλα λόγια υπάρχουν τρία θέματα υπό εξέταση στη διαδικασία της σύνθεσης:

(1) χρονικές συνέχειες στην ανάπτυξη και αύξηση μιας καλλιέργειας σε μια περιοχή,

(2) χωρική κατανομή των ειδών και ποικιλιών μιας καλλιέργειας σε διαφορετικές περιοχές και

(3) συνδυασμός διάφορων αναλύσεων σύμφωνα με την ακρίβεια και αξία τους.

**(1) Χρονικές συνέχειες.** Όταν έχει γίνει πρόγνωση για κάθε στάδιο ανάπτυξης σε μια δοσμένη περιοχή, τότε θα πρέπει να γίνει ένας συνδυασμός όλων των επιμέρους προγνώσεων. Δύο μέθοδοι συνδυασμού είναι δυνατοί:

(α) δυνατή πρόγνωσης χρονοσειρών και

(β) πολυφασική πρόγνωση χρονοσειρών.

Με τον όρο δυνατότητα στην πρώτη κατηγορία εννοούμε ότι υπάρχει μεγάλη πιθανότητα το υπό μελέτη γεγονός να συμβεί. Σαν «δυνατή απόδοση» ορίζουμε την πραγματική απόδοση η οποία μπορεί να πραγματοποιηθεί στο τέλος της καλλιεργητικής περιόδου.

Αναφέρεται σαν παράδειγμα το ακόλουθο: Νωρίς κατά τη καλλιεργητική περίοδο, μια καλλιέργεια μπορεί να αναπτύσσεται πολύ ικανοποιητικά με μεγάλη πιθανότητα να εμφανίσει καλή απόδοση. Σε αυτή τη φάση «η δυνατή απόδοση» είναι μεγάλη. Αργότερα ωστόσο, για οποιοδήποτε λόγο, η δυνατή απόδοση μπορεί να πέσει στο μηδέν. Το παράδειγμα αυτό δείχνει το γεγονός ότι η δυνατή παραγωγή είναι μια μεταβλητή συνάρτηση του χρόνου κατά τη διάρκεια της καλλιεργητικής περιόδου.

Η διαδικασία πρόγνωσης με βάση τις χρονικές συνέχειες δίνεται συνήθως με τη βοήθεια ενός «δένδρου πρόγνωσης». Ένα τέτοιο σχηματικό διάγραμμα παρουσιάζεται στο σχήμα 4.6. Όλα τα σύμβολα αποσαφηνίζονται πλήρως πάνω στο διάγραμμα.

Υποσημειώσεις χρησιμοποιούνται για να δείξουν τις διαβαθμίσεις στην αύξηση και την ανάπτυξη: όσο μικρότερος ο αριθμός, τόσο πιο κοντά βρίσκεται η συγκεκριμένη καλλιέργεια στο άριστο στάδιο ανάπτυξης/αύξησης. Για παράδειγμα το E1 μπορεί να αναφέρεται σε μια ομοιομορφία και/ή μια υψηλή βλαστικότητα της καλλιέργειας, ενώ το E3 αντιπροσωπεύει μια μικρή ομοιομορφία και μικρή βλαστικότητα. Η τελευταία στήλη αναφέρεται στις αποδόσεις ντομάτας εκφρασμένες σε τόνους ανά εκτάριο.

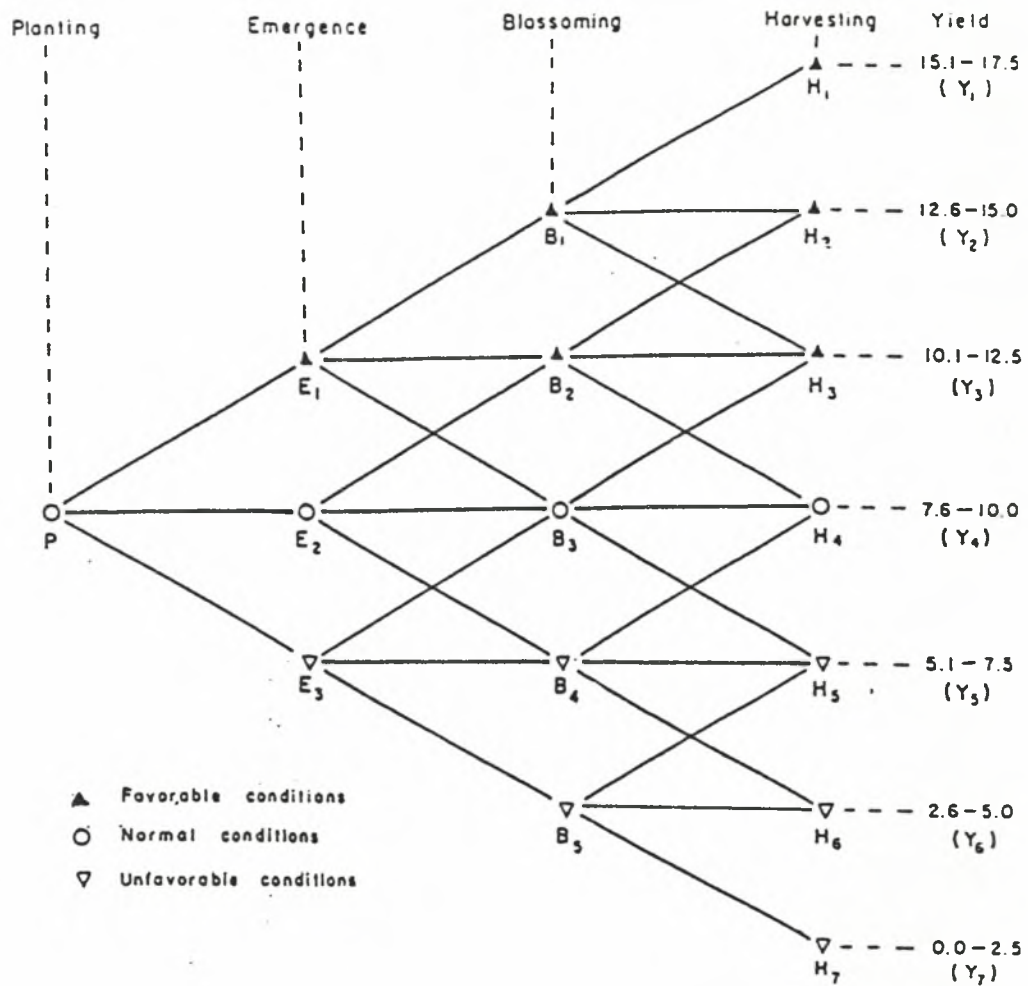
Οι χρονοσειρές στην πρόγνωση μπορούν να βρεθούν με τη βοήθεια του «δένδρου πρόγνωσης». Για παράδειγμα αυτός που κάνει τη πρόγνωση μπορεί να ξεκινήσει τη διαδικασία πρόγνωσης της απόδοσης τη στιγμή της σποράς (P), στηρίζοντάς την στο έδαφος και το περιβάλλον κατά τη στιγμή P. Μπορεί να δώσει μια πρώτη εκτίμηση της απόδοσης υποθέτοντας ότι θα ακολουθήσει μια φυσιολογική καλλιεργητική περίοδος π.χ. ακολουθώντας την ευθεία του διαγράμματος.

Αυτό περιέχει πάντοτε ρίσκο. Στην περίπτωση που οι εδαφικές συνθήκες είναι ευνοϊκές, μπορεί να ακολουθήσει τη διαδρομή P---E1---καταλήγοντας στο H3. Από το πίνακα που δίνει τις αποδόσεις μπορεί τότε να προβλέψει μια απόδοση των 10.1-12.5 τόνων το εκτάριο. Στη περίπτωση στην οποία υπάρχει μία μη ευνοϊκή εποχή η διαδρομή που θα ακολουθήσει θα είναι P---E3---B4 καταλήγοντας στο H5, με μια αναμενόμενη απόδοση 5.1-7.5 τόνους το εκτάριο.

Με τον ίδιο τρόπο παρόμοιες διαδικασίες μπορούν να ακολουθηθούν σε άλλες φάσεις της ανάπτυξης. Με άλλα λόγια, η δυνατή απόδοση μπορεί να προβλεφθεί σε κάθε στάδιο ανάπτυξης. Η δυνατή πρόβλεψη, δίνει έμφαση στη τελική επίδοση, όπως η απόδοση, η ποιότητα και ο βαθμός ωρίμανσης.

Το δένδρο πρόγνωσης, μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί για πολλαπλή πρόγνωση, στην οποία φτάνουμε στην πρόβλεψη της απόδοσης μέσω διαδοχικών προβλέψεων διαφόρων φάσεων. Με άλλα λόγια τρία βήματα εμπλέκονται σε αυτή την περίπτωση

- (1) πρόβλεψη της E κατά τη διάρκεια του P,
- (2) πρόβλεψη του B στο E και
- (3) πρόβλεψη του H (ή της απόδοσης) στο B.



**Σχήμα 4.5** Σχηματικό διάγραμμα ενός <<δένδρου>> πρόγνωσης για συγκεκριμένη χρονική περίοδο.



**(2) Χωρική κατανομή.** Στις αναλογικές μελέτες θεωρείται ότι με παρόμοιο εδαφικό τύπο και συνθήκες περιβάλλοντος, ένας παραγωγός θα παράγει παρόμοια σε ποσότητα και ποιότητα προϊόντα, εάν οι καλλιεργητικές πρακτικές, τα είδη και οι ποικιλίες παραμείνουν σταθερά. Για να εφαρμοστεί αυτή η μέθοδος, διάφορες σημαντικές περιβαλλοντικές παράμετροι των τρεχόντων δεδομένων θα πρέπει να αναλυθούν, για να γίνει εφικτή η σύγκριση γνωστών τιμών παραγωγής με τις άγνωστες.

Στη περίπτωση που χρησιμοποιείται αυτή η μέθοδος, αυτός που κάνει την πρόγνωση θα πρέπει να περιμένει μέχρι να γίνει γνωστή η παραγωγή της πρώτης περιοχής, χωρίς τη γνώση της οποίας δεν μπορεί να γίνει σύγκριση. Τα μειονεκτήματα αυτής της μεθόδου είναι:

- (α) είναι σχεδόν αδύνατο να επιτευχθεί μια πρόγνωση πολύ νωρίς,
- (β) δεν υπάρχουν δύο περιοχές απολύτως όμοιες σε εδαφικό τύπο και περιβαλλοντικές συνθήκες,
- (γ) δεν μπορεί να βρεθεί για όλες τις περιοχές μια παρόμοιά τους για σύγκριση.

Τα παραπάνω υποδηλώνουν πως η αναλογική μέθοδος δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί στη πράξη.

Παρόλα όμως τα μειονεκτήματα υπάρχουν περιπτώσεις στις οποίες η αναλογική μέθοδος έχει χρησιμοποιηθεί με επιτυχία (π.χ. μελέτη συσχέτισης των αποδόσεων σε γλυκό καλαμπόκι και μπιζέλια σε 4 περιοχές).

Οι αναλογικές μέθοδοι μπορούν να εφαρμοστούν κάτω από δύο προϋποθέσεις:

- (α) σε μια μεταξύ-περιοχών σύγκριση της κατάστασης αύξησης σε ένα συγκεκριμένο στάδιο (όπως για παράδειγμα σύγκριση αριθμού φρούτων ή ανθέων) ή
- (β) για σύγκριση μεταξύ σταδίων αύξησης στην ίδια όμως περιοχή.

**(3) Συνδυασμός διαφόρων αναλύσεων.** Αυτό αποτελεί το τελευταίο βήμα της σύνθεσης. Αυτός που κάνει την πρόγνωση αφού έχει πραγματοποιήσει όλες τις ενέργειες για το (α) και (β) βήμα αυτού του κεφαλαίου, πρέπει να πάρει μια απόφαση για το πιο δρόμο θα ακολουθήσει. Στην προσπάθεια αυτή έμφαση θα πρέπει να δοθεί στην ανεύρεση «σημαντικών στοιχείων» και μιας «σημαντικής περιόδου». Με την γνώση των ανωτέρων αυτός που κάνει την πρόγνωση θα μπορεί να πραγματοποιήσει την πρώτη του προσέγγιση.

Ο συνδυασμός διαφόρων προβλέψεων μπορεί να πραγματοποιηθεί με τη χρήση του συντελεστής συμμεταβολής. Η παραπάνω θέση με μορφή εξίσωσης έχει ως εξής:

$$Q_c = \frac{r_i}{\sum_{i=1}^n r_i} Q_i + \frac{r_{i+1}}{\sum_{i=1}^n r_i} Q_{i+1} + \dots + \frac{r_n}{\sum_{i=1}^n r_i} Q_n$$

Όπου  $Q_c$  αποτελεί τη τελική ή συνδυασμένη πρόγνωση,  $Q_1, Q_2, Q_3, \dots, Q_n$  αποτελούν τις προγνώσεις εκτιμώμενες με διαφορετικές προσεγγίσεις και  $r_1, r_2, r_3, \dots, r_n$  αποτελούν τους συντελεστές της γραμμικής ή

πολλαπλής συμμεταβολής για κάθε διαφορετική προσέγγιση. Από τη στιγμή που ο επιλεγόμενος συνδυασμός περιλαμβάνει διάφορους συνδυασμούς πιθανών προσεγγίσεων σε σχέση με όλους τους διαθέσιμους παράγοντες, η διαδικασία μπορεί εύκολα να παρουσιαστεί με ένα διάγραμμα, όπως φαίνεται στο σχήμα 4.6.

Παρουσιάζονται στο εν λόγω σχήμα, πέντε προσεγγίσεις από τις οποίες οι κλιματικές, τοπικές και φαινολογικές θεωρούνται οι κυριότερες και οι παραμετρικές και υποκειμενικές προσεγγίσεις θεωρούνται συμπληρωματικές. Στις κλιματικές προσεγγίσεις, τα σύμβολα  $E_1, E_2, \dots, E_n$  αντιπροσωπεύουν μεμονωμένα στοιχεία όπως π.χ. σχετικό ελάχιστο βροχόπτωσης τα οποία εξαρτώνται από αυτόν που θεωρείται κύριος παράγοντας. Αυτά τα μεμονωμένα στοιχεία εκτιμώνται ανάλογα με την επίδραση που έχουν στην καλλιέργεια. Στην τοπική προσέγγιση τα σύμβολα  $A_1, A_2, \dots, A_n$  αντιπροσωπεύουν τη σχέση μιας άγνωστης με μια γνωστή περιοχή.

Στην φαινολογική προσέγγιση τα σύμβολα  $P_1, P_2, \dots, P_n$  δηλώνουν τη σχέση μεταξύ συμβάντων δύο διαφορετικών φαινολογικών σταδίων χωρίς να λαμβάνονται υπόψη οι διάφορες άμεσες περιβαλλοντικές επιδράσεις.

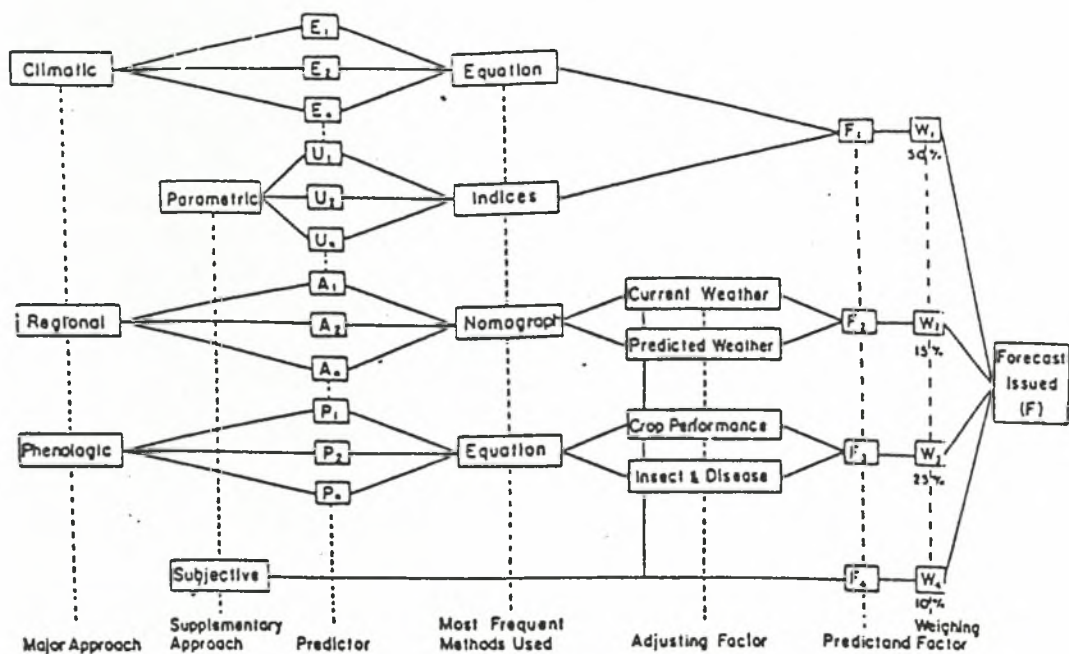
Οι επιπρόσθετες προσεγγίσεις λειτουργούν σαν βοήθεια για παραπέρα προσαρμογή των τριών κύριων προσεγγίσεων που προαναφέρθηκαν. Η παραμετρική προσέγγιση που μοιάζει κατά κάποιο τρόπο με τη κλιματική προσέγγιση, εκφράζεται στα πλαίσια των προβλέψεων  $U_1, U_2, \dots, U_n$  που παριστάνουν φωτοκλιματικά, θερμοκλιματικά και υδροκλιματικά τμήματα αντίστοιχα.

Επιπρόσθετα με την παραμετρική προσέγγιση, μια άλλη συμπληρωματική προσέγγιση είναι οι συμπληρωματικοί προσδιορισμοί, που βασίζεται σε προσωπική εμπειρία, σε συσχέτιση με τις παρούσες καλλιέργειες και τις καιρικές συνθήκες. Όλες οι παραπάνω προσεγγίσεις, με εξαίρεση την υποθετική προσέγγιση, μπορούν να εκφραστούν με διάφορα μέσα όπως ισότητες, γραμμές συσχέτισης ή άλλα στατιστικά μέσα. Η τεχνική του συνδυασμού μπορεί να είναι γραμμική ή μη γραμμική. Η εκλογή συγκεκριμένης τεχνικής εξαρτάται από τη φύση των παραγόντων πρόβλεψης που συνδυάζονται.

Η χρήση δύο ή περισσότερων παρόμοιων παραγόντων πρόβλεψης σε μια προσέγγιση ή σε διαφορετικές προσεγγίσεις πρέπει, όσο είναι δυνατό, να αποφεύγεται. Για παράδειγμα, στην κλιματική προσέγγιση, εάν υπάρχουν αξιόπιστα δεδομένα εδαφικής υγρασίας, τότε δεν χρειάζονται τα στοιχεία βροχόπτωσης. Η ολοκληρωμένη αποφυγή της χρήσης παρόμοιων παραγόντων πρόβλεψης σε δύο ή περισσότερες προσεγγίσεις δεν είναι πάντοτε δυνατή ή επιθυμητή, διότι πολλές φορές η συνδυασμένη επίδραση διαφόρων παραγόντων σαν ομάδα, πρέπει να ληφθεί σοβαρά υπόψη.

Για παράδειγμα, όταν η φωτοθερμική μονάδα (PTU) χρησιμοποιείται σαν παράγοντας πρόβλεψης σε μια παραμετρική προσέγγιση, η παράβλεψη της θερμοκρασίας και της φωτοπερίόδου είναι αναπόφευκτη, ακόμα και αν έχουν ήδη χρησιμοποιηθεί στην κλιματική προσέγγιση. Συμπερασματικά η επιλογή βασίζεται στη σχέση μεταξύ «σημαντικής περιόδου» και «σημαντικού στοιχείου».

Μια άλλη πλευρά της επιλογής του παράγοντα πρόβλεψης είναι η άποψη της «φυσιολογικής αναγκαιότητας». Η αύξηση και ανάπτυξη των φυτών είναι προκαθορισμένη σε μεγάλο βαθμό από τα πρώτα στάδια των περιβαλλοντικών συνθηκών.



Σχήμα 4.6 Διάγραμμα συνδυασμένων διαδικασιών πρόβλεψης.

Με άλλα λόγια η ανάπτυξη του φυτού αντανακλά σε κάθε στάδιο τις περιβαλλοντικές συνθήκες στις οποίες έχει εκτεθεί, κατά τα προηγούμενα στάδια της ιστορίας της ζωής του.

Το χρονικό διάστημα για μια επίδραση συγκεκριμένων περιβαλλοντικών συνθηκών που αποκαλύπτεται σε ένα μεταγενέστερο στάδιο, ποικίλει ανάλογα με το είδος και την ποικιλία του φυτού. Η ακολουθία είναι βασικά ένα κυκλικό φαινόμενο. Το περιβάλλον κατά την ωρίμανση μπορεί να προκαθορίσει τη γενιά των σπερμάτων και το περιβάλλον κατά το στάδιο της σποράς μπορεί να προκαθορίσει την πρωιμότητα και την ένταση της άνθισης, η οποία μπορεί να προκαθορίσει την πρωιμότητα της γονικής ωριμότητας.

Όπως έχει αναφερθεί, τέτοια φαινόμενα όπως η σκληραγώγηση, η φωτοπερίοδος, η φωτοθερμική υποβολή και ο λήθαργος είναι παραδείγματα «φυσιολογικών προ-συνθηκών». Το πλεονέκτημα να συμπεριληφθεί η έννοια «φυσιολογικές προ-συνθήκες», στην επιλογή των παραγόντων πρόβλεψης, είναι αυτό που κάνει δυνατή μια έγκυρη πρόβλεψη. Δηλαδή, η δυναμική πρόβλεψη ακολουθιών στο χρόνο μπορεί να ενδυναμωθεί. Αυτό είναι ιδιαίτερα χρήσιμο όταν περιλαμβάνονται προβλήματα ανάπτυξης φυτών.

Εφόσον οι κλιματικές και παραμετρικές προσεγγίσεις είναι περιβαλλοντικές στη φύση, χρησιμοποιούνται σε συνδυασμό, όταν η πρόβλεψη αναζητά τη χρήση και των δύο. Το σύμβολο  $W_1$  εκφράζει τον παράγοντα που αντιστοιχεί σε 50% του  $F_1$  στην τελική πρόβλεψη. Στην προσέγγιση κατά περιοχή, ο υπάρχων και προβλεπόμενος καιρός θα πρέπει να περιληφθούν αν το  $F_2$  είναι γνωστό. Ο παράγοντας  $W_2$  αντιπροσωπεύει το 15% του  $F_2$  που περιλαμβάνεται στην τελική πρόβλεψη.

Παρομοίως, στην φαινολογική προσέγγιση, η κατάσταση της ζημιάς από έντομα και ασθένειες, αν όχι σοβαρές, θα πρέπει να συμπεριληφθούν στους παράγοντες προσαρμογής. Τα σύμβολα  $F_3$  και  $W_3$  (ή 25% του  $F_3$ ), παριστάνουν την πρόβλεψη και τον αντίστοιχο παράγοντα στην φαινολογική προσέγγιση. Ο υποθετικός παράγων σε σχέση με όλους τους προσαρμοζόμενους παράγοντες παριστάνεται από το  $F_4$ , που περιγράφεται από το  $W_4$ .

Τέλος η τελική πρόβλεψη  $F$  εκφράζεται ως το σύνολο των απαραίτητων παραγόντων πρόβλεψης :

$$F=W_1F_1+W_2F_2+W_3F_3+W_4F_4 \quad (4-7)$$

Το ποσοστό που αντιπροσωπεύει ο κάθε παράγων ( $W$ ) δεν είναι σταθερό. Τα ποσοστά που χρησιμοποιούνται παραπάνω αναφέρονται στην περίπτωση, που και οι 5 παράγοντες χρησιμοποιούνται. Κάθε πρόβλεψη δεν χρειάζεται και τους 5 παράγοντες και στη περίπτωση που χρησιμοποιούνται λιγότεροι από 5, τα ποσοστά θα πρέπει να προσαρμόζονται έτσι ώστε το σύνολο να είναι 100%.

Ο Wang (1958) έχει αναπτύξει αρκετές μεθόδους συνδυασμού των παραγόντων ή μεταβλητών που αφορούν τις σχέσεις φυτών-περιβάλλοντος. Ανάλογα με τον τρόπο προσέγγισης μπορούν να ταξινομηθούν σε γραφικές, μαθηματικές και στατιστικές προσεγγίσεις.

Στην γραφική προσέγγιση, οι Wang & Tibbitts (1956) τις απαιτήσεις σε νερό του καπνού τύπου cigar-binder στο Madison του Wisconsin. Πρώτα ανέλυσαν τη σχετική ελάχιστη βροχόπτωση σε εβδομαδιαία διαστήματα κατά



τη διάρκεια της αυξητικής περιόδου, και εισήγαγαν τα αποτελέσματα σε ένα γράφημα ορθογωνίων αξόνων, με τεταγμένη τη βροχόπτωση και τετμημένη τα διάφορα έτη. Στο διάγραμμα σχεδιάζονται ισοϋετείς καμπύλες ανά ίντσα βροχής, ενώ εισάγονται και οι τιμές της παραγωγής του καπνού. Αυτό φαίνεται στο σχήμα 4.7.

Όσον αφορά τις τιμές αυτές, είναι αξιοσημείωτο το γεγονός ότι υπάρχει μία γενική τάση τα όρη των ισοϋετών να συμπίπτουν με τα έτη που η παραγωγή είναι χαμηλή, και οι κοιλάδες με τα έτη που η παραγωγή είναι υψηλή. Για παράδειγμα, το «ψηλό» όρος του έτους 1937 τελικά αντιστοιχούσε και στο έτος με την χαμηλότερη παραγωγή. Ομοίως, η κοιλάδα του έτους 1938 έδωσε έτος με υψηλή παραγωγή. Προσοχή επίσης στο έτος 1934, όπου οι ισοϋετείς για τις χαμηλότερες τιμές (1'', 2'') βρίσκονται σε κοιλάδα, ενώ οι ισοϋετείς για τις υψηλότερες τιμές όπως οι 3'', 6'' είναι σίγουρα σε όρος. Στην περίπτωση αυτή πάλι εμφανίζεται η προαναφερθείσα τάση.

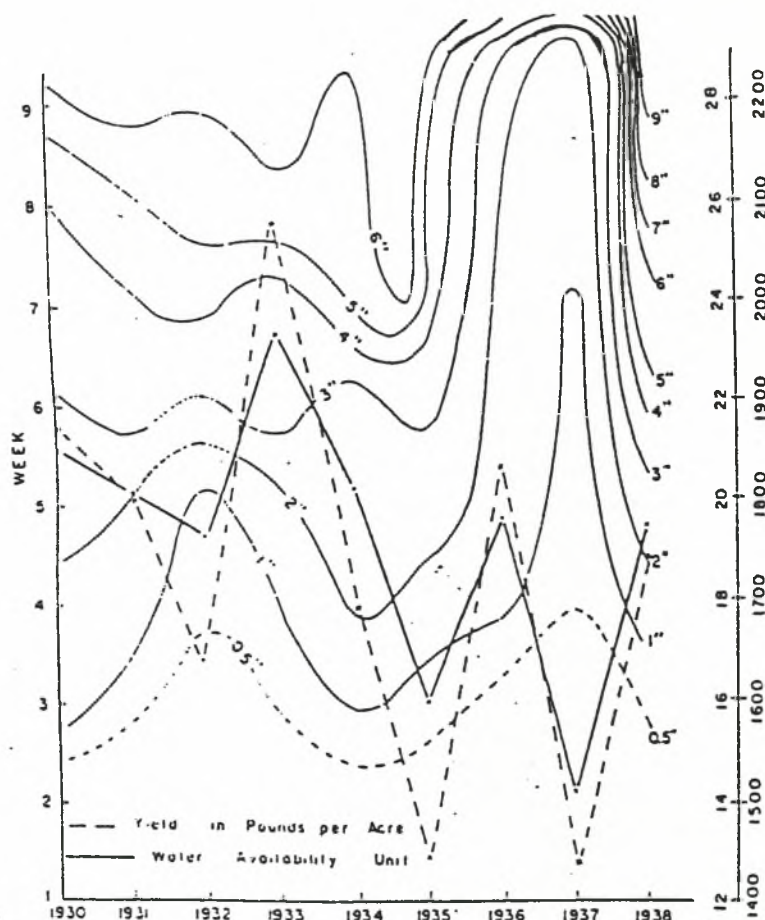
Αν εξισορροπηθούν και οι δύο επιδράσεις, το αναμενόμενο αποτέλεσμα είναι ένα έτος με μέση παραγωγής. Πράγματι, η μέση παραγωγή καπνού για τα 9 αυτά έτη ήταν 1730 λίβρες φύλλων ανά εκτάριο, και η παραγωγή του 1934 ήταν 1699 λίβρες. Η απόσταση από τη μέση τιμή είναι 31 λίβρες, η τυπική απόκλιση από τον μέσο είναι 206,4, και ο συντελεστής παραλλακτικότητας 11,9%. Το συγκεκριμένο έτος τα φαινολογικά δεδομένα του καπνού, όπως η ημερομηνία του κορφολογήματος και η vegetative περίοδος, ήταν επίσης πολύ κοντά στους αριθμητικούς μέσους. Η μέση ημερομηνία κορφολογήματος ήταν η 8 Αυγούστου, και η μέση vegetative περίοδος 57 ημέρες. Για το 1934 ήταν 9 Αυγούστου και 57 ημέρες.

Αυτό δείχνει ότι οι ισοϋετείς, οι οποίες αντιπροσωπεύουν την ελάχιστη διαθέσιμη ποσότητα βροχής σε διαφορετικές χρονικές ακολουθίες, καθορίζουν την παραγωγή, καθώς και την vegetative αύξηση.

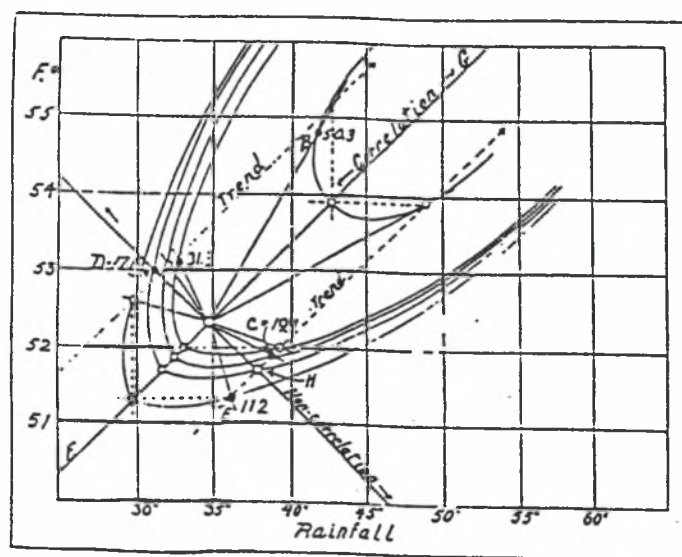
Στο σχήμα 4.7 επιλέχθηκε αυθαίρετα μία ευθεία ως βάση. Μετράται η απόσταση μεταξύ της βάσης και της τομής μιας ισοϋετούς με τον άξονα ενός έτους. Για τα περισσότερα έτη, η παραγωγή μεταβάλλεται ανάλογα με την απόσταση αυτή. Παρόμοιες διαδικασίες μπορούν να ακολουθηθούν και για άλλες παραμέτρους εκτός από τη σχετική ελάχιστη βροχόπτωση. Έτσι, θα μπορούσε να καθοριστεί μία διαφορετική θέση για την ευθεία βάσης, η οποία θα έδινε διαφορετικές αποστάσεις σε κάθε μέτρηση. Ανεξάρτητα από τη θέση της βάσης, ή τη μονάδα μέτρησης που χρησιμοποιείται για τη μέτρηση της απόστασης, το τελικό αποτέλεσμα θα είναι το ίδιο, γιατί σημασία έχουν οι σχετικές και όχι οι απόλυτες τιμές των παραμέτρων. Εφόσον όλες οι αποστάσεις εκφράζονται στις ίδιες μονάδες (ίντσες), είναι δυνατός ο συνδυασμός παραγόντων με δύο οι περισσότερες διαφορετικές μονάδες.

Το αλγεβρικό άθροισμα των αποστάσεων αυτών (μετρημένων σε κάθε διάγραμμα για καθένα έτος) μπορεί να ονομαστεί «συνδυασμένη μονάδα (combined unit)». Οι Wang & Tibbitts χρησιμοποίησαν το αλγεβρικό άθροισμα της σχετικής ελάχιστης βροχόπτωσης, την βροχόπτωση πριν την αυξητική περίοδο, το έλλειμμα της πίεσης των ατμών, και την παραγωγή-βροχερές ημέρες σε συσχέτιση με την παραγωγή καπνού.

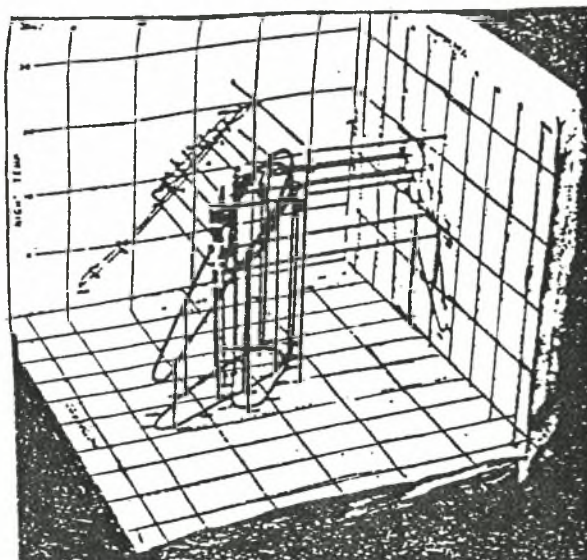
Εδώ, η «συνδυασμένη μονάδα» ονομάστηκε «μονάδα διαθεσιμότητας νερού (water availability unit)», όπως φαίνεται στο σχήμα 4.7. Η παραγωγή φύλλων καπνού σε λίβρες ανά εκτάριο παρίσταται με ευθείες, ενώ οι μονάδες διαθεσιμότητας νερού παρίστανται με διακεκομμένες ευθείες.



**Σχήμα 4.7** Μονάδες διαθεσιμότητας νερού και παραγωγή καπνού τύπου cigar-binder στο Madison του Wisconsin τα έτη 1930-1938.

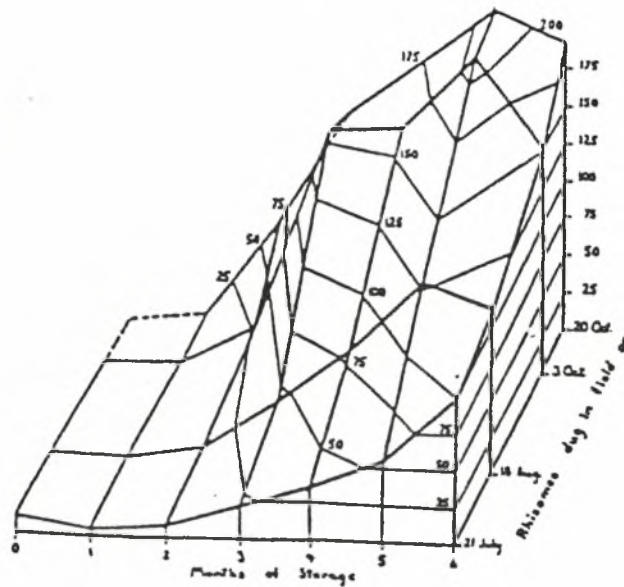


Σχήμα 4.8 Γραφική παράσταση θερμοκρασίας-βροχόπτωσης.



**Σχήμα 4.9** Σχέσεις μεταξύ της θερμοκρασίας της ημέρας, της νυκτερινής θερμοκρασίας, της φωτοπεριόδου και της άριστης αύξησης ενός αριθμού λουλουδιών,





**Σχήμα 4.10** Η περίοδος λήθαργου του φυτού *veratrum viride* κατά την αποθήκευση, σε σχέση με τον χρόνο αποθήκευσης και τον χρόνο 'σκαψίματος'.

Υπάρχει γραμμική συσχέτιση μεταξύ της μονάδας διαθεσιμότητας νερού και της παραγωγής καπνού για την οποία ισχύει  $r=0,92$ ,  $r^2=0,85$  και  $P=0,01$ . Η γραφική παράσταση μπορεί να γίνει ακόμη πιο ακριβής αν υπάρχουν μετρήσεις της υγρασίας του εδάφους και της εξατμισοδιαπνοής.

Οι Wang & Bomalaski (1958) εξέτασαν παραπέρα τη σημαντικότητα των «μονάδων διαθεσιμότητας νερού» στη μελέτη τους για τις αντικειμενικές μεθόδους συσχέτισης διαφόρων παραγόντων της υγρασίας με την παραγωγή και την ποιότητα των μπιζελιών τύπου Αλάσκα στην περιοχή Gillet-Bonduel του Wisconsin.

Ταξινόμησαν την παραγωγή των μπιζελιών σε τρεις κατηγορίες σύμφωνα με τις ενδείξεις του tenderometer (T.R.): T.R.=90-99, T.R.=100-109 και T.R.=110-119. Το αποτέλεσμα ήταν η μέση πραγματική παραγωγή να είναι 1394 λίβρες ανά εκτάριο, ενώ η μέση εκτιμώμενη τιμή ήταν 1376. Η απόκλιση ανάμεσα στην πραγματική και την εκτιμώμενη τιμή για κάθε μεμονωμένο έτος κυμαίνονταν από 13 έως 182 λίβρες ανά εκτάριο.

Η μέση τυπική απόκλιση της παραγωγής για τις 3 μετρήσεις του tenderometer ήταν 354.3, και ο μέσος συντελεστής παραλλακτικότητας 25,2%.

Αυτοί που κάνουν την καλύτερη χρήση γραφικών λύσεων για την επίλυση πρακτικών προβλημάτων είναι οι μηχανικοί. Εδώ θα μπορούσαν να χρησιμεύσουν νομογραφήματα αν επιλέγονταν οι κατάλληλες συντεταγμένες. Ως συντεταγμένες θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν οι περιβαλλοντικές μονάδες, όπως οι φωτοκλιματικές, οι θερμοκλιματικές και οι υδροκλιματικές μονάδες και τα διάφορα φαινολογικά ενδεχόμενα. Οι μετεωρολόγοι και οι κλιματολόγοι έχουν υιοθετήσει σε μεγάλο βαθμό τη γραφική προσέγγιση για ανάλυση παραμέτρων που ανάγονται σε τοπικά χαρακτηριστικά.

Οι φυτοπαθολόγοι και οι κλιματολόγοι χρησιμοποιούν το κλιμογράφημα (climograph) και το hythergraph. Το κλιμογράφημα είναι η γραφική παράσταση της θερμοκρασίας σε σχέση με την σχετική υγρασία, και το hythergraph (Σχήμα 4.8), η γραφική παράσταση θερμοκρασίας-βροχόπτωσης.

Ο Tehon, ήδη από το 1928, είχε μελετήσει την ένταση των επιδημιών σκωρίασης των φύλλων του σιταριού στο Illinois με τη χρήση hythergraph, όπου η τετμημένη είναι η ετήσια βροχόπτωση και η τεταγμένη η ετήσια μέση θερμοκρασία, όπως φαίνεται στο σχήμα 4.8. Η σοβαρότερη επιδημία σκωρίασης εμφανίζεται με το δείκτη 50,3 στο σημείο Β, ενώ η ένταση μειώνεται καθώς κινούμαστε προς τις εξωτερικές ομόκεντρες καμπύλες (σημεία Δ και Ε). Το σχήμα 4.8 αποτελεί παράδειγμα της χρήσης τριών μεταβλητών σε δισδιάστατο διάγραμμα. Αν εισαχθούν και οι ημερομηνίες στις οποίες παρατηρήθηκαν οι διάφορες τιμές, παρουσιάζεται και μία τέταρτη μεταβλητή στο δισδιάστατο αυτό διάγραμμα.

Η χρήση τεσσάρων μεταβλητών σε τρισδιάστατα διαγράμματα θα επέτρεπε να εξακριβωθούν οι τιμές τεσσάρων παραγόντων με μία ματιά. Για παράδειγμα, ο Went (1957) χρησιμοποίησε 4 μεταβλητές σε τρισδιάστατα διαγράμματα για να ερμηνεύσει τα πειραματικά αποτελέσματα που προέκυψαν στο phytotron. Τα διαγράμματα φαίνονται με περισσότερες λεπτομέρειες στα σχήματα 4.9 και 4.10.

Το σχήμα 4.9 δείχνει τις σχέσεις μεταξύ της θερμοκρασίας της ημέρας, της νυκτερινής θερμοκρασίας, της φωτοπερίοδου και της άριστης αύξησης ενός αριθμού λουλουδιών, τα οποία συμβολίζονται ως εξής:

S	Αφρικανική βιολέτα, <i>Saintpaulia ioantha</i>
P	<i>Petunia</i>
Z	<i>Zinnia elegans</i>
C	China aster, <i>Callistephus chinensis</i>
A	<i>Ageratum conyzoides</i>
M	Άγρια βιολέττα (Stock), <i>Matthiola incana</i>
PA	Ισλανδική παπαρούνα, <i>Papaver nudicaule</i>
B	Αγγλική μαργαρίτα, <i>Bellis perennis</i>

Το μηνιαίο κλίμα της Pasadena (άνω έλλειψη) και του Denver (κάτω έλλειψη) έχουν σχεδιαστεί με παχιά μαύρη γραμμή. Η ορθογώνια προβολή των δύο ελλείψεων φαίνεται σε καθένα από τα επίπεδα, όπου παρίστανται δισδιάστατες σχέσεις. Το σχήμα 4.10 παριστά τη σχέση αύξησης των πρώτο μήνα μετά την αποθήκευση (storage) (τεταγμένη) και χρόνου αποθήκευσης στους 2°C (τετμημένη) του φυτού *veratrum viride*, το οποίο αποκτήθηκε από τον αγρό τις περιόδους 21 Ιουλίου-18 Αυγούστου και 3-20 Οκτωβρίου.

Βρέθηκε ότι οι βολβοί που είχαν συλλεχθεί κατά ή μετά την αυξητική περίοδο έπεσαν σε βαθύ λήθαργο που μπορούσε να διακοπεί μόνο με αποθήκευση στους 2-4°C, ενώ σχεδόν όλοι οι βολβοί που είχαν φυλαχθεί στους 6°C ή υψηλότερα σάπισαν ή παρέμειναν σε λήθαργο.

Όπως αναφέρθηκε, δεν έχει μέχρι σήμερα κατασταθεί δυνατό να δωθεί μία μόνο αριθμητική τιμή σε ένα δοσμένο σύνολο κλιματικών ή περιβαλλοντικών παραγόντων. Επομένως, είναι αναγκαία η εργασία με μεμονωμένα συστατικά του κλίματος, τα οποία συνδυάζονται με τη βοήθεια μερικών διαφορικών εξισώσεων.

Όταν εμπλέκονται τέτοιου είδους μαθηματικοί υπολογισμοί, αποκτά κεφαλαιώδη σημασία η διαφοροποίηση των σταθερών από τις μεταβλητές, καθώς και η εξάλειψη των μεταβλητών. Ένα μεμονωμένο φαινολογικό ενδεχόμενο, η παραγωγή της καλλιέργειας, χρησιμοποιείται εδώ ως παράδειγμα της μαθηματικής διατύπωσης.

Έστω ότι η δυνητική παραγωγή ( $Y_p$ - potential yield) αποτελεί συνάρτηση των βιολογικών (b), εδαφικών (e), κλιματικών (c), και χρονικών (t) παραγόντων. Μαθηματικά αυτό εκφράζεται ως εξής

$$Y_p = Y_p (b, e, c, t) \quad (4-8)$$

Η «δυνητική παραγωγή»  $Y_p$  ορίζεται εδώ ως η παραγωγή που θα μπορούσε να επιτευχθεί στο τέλος της αυξητικής περιόδου. Στις αρχές της αυξητικής περιόδου, οι καλλιέργειες μπορεί να αναπτύσσονται καλά και να υπάρχει μία καλή πιθανότητα επίτευξης της βέλτιστης παραγωγής. Εκείνη την περίοδο, η «δυνητική παραγωγή» είναι υψηλή. Ωστόσο, αργότερα, ένας παγετός στα μέσα της περιόδου ή κάποια άλλη κλιματική καταστροφή μπορεί να μειώσουν τη «δυνητική παραγωγή» στο μηδέν. Το παράδειγμα αυτό δείχνει ότι η δυνητική παραγωγή αποτελεί στην ουσία μία μεταβλητή συνάρτηση του χρόνου κατά τη διάρκεια της αυξητικής περιόδου.

Αν όλοι οι περιβαλλοντικοί παράγοντες έμεναν σταθεροί, η παραγωγή θα παρουσίαζε ελάχιστες μόνο μεταβολές. Επίσης αν όλοι οι περιβαλλοντικοί παράγοντες έπαιρναν τις ευνοϊκότερες τιμές τους, θα αναμένονταν μέγιστες παραγωγές. Επομένως, παρουσιάζεται φυσιολογική

παραγωγή όταν υφίστανται συγκεκριμένοι συνδυασμοί των περιβαλλοντικών συνθηκών, πχ όταν όλες οι συνθήκες είναι ευνοϊκές. Αυτό που προβληματίζει είναι η απόκλιση από τις φυσιολογικές τιμές, καθώς αυτή η απόκλιση είναι υπεύθυνη για τις μεταβολές της παραγωγής σε κάθε περίοδο.

Έστω  $dY_p$  η μεταβολή της δυνητικής παραγωγής. Οι μεταβλητές μπορούν να απομονωθούν ως εξής:

$$dY_p = (\partial Y_p / \partial b)_{e,c,t} db + (\partial Y_p / \partial e)_{b,c,t} de + (\partial Y_p / \partial c)_{b,e,t} dc + (\partial Y_p / \partial t)_{b,c,e} dt \quad (4-9)$$

Οι δείκτες σημειώνουν τους παράγοντες που διατηρούνται σταθεροί. Η ολική μεταβολή της δυνητικής παραγωγής προς τον χρόνο  $dY_p/dt$  θα είναι

$$dY_p/dt = (\partial Y_p / \partial b)_{e,c,t} db/dt + (\partial Y_p / \partial e)_{b,c,t} de/dt + (\partial Y_p / \partial c)_{b,e,t} dc/dt + (\partial Y_p / \partial t)_{b,c,e} \quad (4-10)$$

Η εξίσωση (4-10) ερμηνεύεται ως εξής:

$dY_p/dt$  η μεταβολή της δυνητικής παραγωγής ( $Y_p$ ) σε συνάρτηση με το χρόνο.

$\int_{D_p}^{D_M} dY_p/dt \dots$  είναι η πραγματική παραγωγή μετά τη συγκομιδή, όπου  $D_p$  η ημερομηνία φύτευσης και  $D_M$  η ημερομηνία ωρίμανσης (θεωρούμε ότι συμπίπτει με την ημερομηνία συγκομιδής).

$(\partial Y_p / \partial b)_{e,c,t}$  η μερική μεταβολή της δυνητικής παραγωγής εξαιτίας των βιοτικών παραγόντων—οι εδαφικοί παράγοντες, το κλίμα και ο χρόνος είναι σταθεροί.

$db/dt$  ο ολικός ρυθμός μεταβολής των βιοτικών παραγόντων σε συνάρτηση με το χρόνο.

$(\partial Y_p / \partial e)_{b,c,t}$  η μερική μεταβολή της δυνητικής παραγωγής εξαιτίας των εδαφικών παραγόντων—οι βιοτικοί παράγοντες, το κλίμα και ο χρόνος είναι σταθεροί.

$de/dt$  ο ολικός ρυθμός μεταβολής των εδαφικών παραγόντων σε συνάρτηση με το χρόνο.

$(\partial Y_p / \partial c)_{b,e,t}$  η μερική μεταβολή της δυνητικής παραγωγής εξαιτίας των κλιματικών παραγόντων—οι βιοτικοί και εδαφικοί παράγοντες, καθώς και ο χρόνος είναι σταθεροί.

$dc/dt$  ο ολικός ρυθμός μεταβολής των κλιματικών παραγόντων σε συνάρτηση με το χρόνο.

$(\partial Y_p / \partial t)_{b,c,e}$  η μερική μεταβολή της δυνητικής παραγωγής με τον χρόνο, ανεξάρτητα από τους βιοτικούς, κλιματικούς και εδαφικούς παράγοντες.

Εξαιτίας των σταθερών πολιτιστικών πρακτικών ή της εφαρμογής του κανόνα της σταθερότητας των βιοτικών παραγόντων η μερική παράγωγος του πρώτου όρου πιθανότατα θα ισούται με το μηδέν, παρόλο που το  $db/dt$  μπορεί να είναι μεγάλο. Έτσι, ο πρώτος όρος του δεξιού μέλους της εξίσωσης (3-10) προσεγγίζει το μηδέν. Δηλαδή:



$$(\theta Y_P/\theta b)_{e,c,t} db/dt \approx 0.$$

Ο τελευταίος όρος της εξίσωσης δηλ.  $(\theta Y_P/\theta t)_{b,c,e}$  αντιπροσωπεύει τη μερική μεταβολή της δυνητικής παραγωγής σε συνάρτηση με το χρόνο, όταν όλοι οι υπόλοιποι παράγοντες διατηρούνται σταθεροί.

Είναι φυσικό να σκεφτεί κάποιος ότι, αν διατηρηθούν σταθεροί οι βιοτικοί, εδαφικοί, και κλιματικοί παράγοντες, η παραγωγή στο τέλος της αυξητικής περιόδου-δηλαδή η δυνητική παραγωγή-εξαρτάται μόνο από τη γενετική σύσταση του φυτού. Όμως, για μια δοσμένη ποικιλία αυτή είτε είναι σταθερή (όταν πρόκειται για υβρίδια) είτε είναι σταθερή κατά μέσο όρο για το σύνολο του αγρού. Επομένως, ο ρυθμός μεταβολής της δυνητικής παραγωγής στην περίπτωση αυτή πρέπει να είναι μηδέν:

$$(\theta Y_P/\theta t)_{b,c,e} = 0.$$

Σύμφωνα με τα παραπάνω, η εξίσωση (4-10) μπορεί να επαναδιατυπωθεί ως εξής:

$$dY_P/dt = (\theta Y_P/\theta e)_{c,t} (de/dt) + (\theta Y_P/\theta c)_{e,t} (dc/dt) \quad (4-11)$$

Η πραγματική παραγωγή  $Y_a$  δίνεται από την ολοκλήρωση της παραπάνω έκφρασης, δηλαδή:

$$Y_a \int_{D_p}^{D_M} dY_P/dt = \int_{D_p}^{D_M} \{ (\theta Y_P/\theta e)_{c,t} (de/dt) + (\theta Y_P/\theta c)_{e,t} (dc/dt) \} dt \quad (4-12)$$

Επομένως σε μια πρώτη προσέγγιση η απόκλιση της παραγωγής από το φυσιολογικό θα είναι :

$$\Delta Y_P = Y_a - \bar{Y} = \sum_{i=p}^M \{ (\theta Y_{Pi}/\theta e_i)_{c,t} \Delta e_i + (\theta Y_{Pi}/\theta c_i)_{e,t} \Delta c_i \} \quad (4-13)$$

όπου ο χρόνος εκτείνεται από την ημερομηνία φύτευσης ως την ημερομηνία συγκομιδής, δηλαδή κατά τη διάρκεια μιας συγκεκριμένης αυξητικής περιόδου.  $\bar{Y}$  είναι η μέση παραγωγή, και  $Y_a - \bar{Y}$  η απόκλιση της παραγωγής από τον μέσο.

Κάθε όρος του δεξιού μέλους της εξίσωσης (4-13) είναι ένα σύμβολο που εκφράζει τη σχέση μιας ομάδας στοιχείων με τα υπόλοιπα. Περαιτέρω κατάτμηση κάθε ομάδας σε μεμονωμένα στοιχεία θα ήταν αρκετά περίπλοκη, αλλά χρήσιμη, και για αυτό είναι αναγκαίος ο ηλεκτρονικός υπολογισμός.

Χάριν ευκολίας, χρησιμοποιείται ένας κλιματικός παράγοντας ως παράδειγμα του πώς μπορεί να επιτευχθεί η κατάτμηση της εξίσωσης (4-13). Έστω ότι ο κλιματικός παράγοντας είναι ο  $C$ : τα διαδοχικά εβδομαδιαία διαστήματα μπορούν να ονομαστούν  $C_1, C_2, C_3, \dots$  κτλ., και θα αντιστοιχούν στο διάστημα της πρώτης, της 2ης, της 3ης εβδομάδας κοκ, αντιστοίχως. Η

χρήση εβδομαδιαίων διαστημάτων αντί για διαστήματα 5 ή 10 ημερών είναι καθαρά αυθαίρετη. Για ένα ορισμένο έτος «X», η εξίσωση (4-13) γίνεται:

$$(\Delta Y_p)_X = \{ (\Delta Y_p / \Delta c_1) dc_1 + (\Delta Y_p / \Delta c_2) dc_2 + \dots \}_X \quad (4-14)$$

όπου ο δείκτης «X» αναφέρεται στο συγκεκριμένο έτος, και τα  $\Delta Y_p / \Delta c_1, \Delta Y_p / \Delta c_2, \dots$  κτλ., είναι οι συντελεστές, οι οποίοι είναι σχεδόν σταθεροί για ένα δοσμένο εβδομαδιαίο διάστημα.

Οι συντελεστές μπορούν να συμβολιστούν με  $k_1, k_2$ , και  $k_3$  αντίστοιχα. Οι όροι  $dc_1, dc_2, dc_3$ , κτλ. είναι οι μεταβολές των κλιματικών παραγόντων για διαφορετικά διαδοχικά εβδομαδιαία διαστήματα. Για μία σειρά ετών, λαμβάνεται μία ομάδα γραμμικών εξισώσεων:

$$\begin{aligned} (\Delta Y_p)_1 &= (K_1 dc_1 + k_2 dc_2 + k_3 dc_3 + \dots)_1 \\ (\Delta Y_p)_2 &= (K_1 dc_1 + k_2 dc_2 + k_3 dc_3 + \dots)_2 \\ (\Delta Y_p)_3 &= (K_1 dc_1 + k_2 dc_2 + k_3 dc_3 + \dots)_3 \\ (\Delta Y_p)_4 &= (K_1 dc_1 + k_2 dc_2 + k_3 dc_3 + \dots)_4 \end{aligned} \quad (4-15)$$

Η σταθερά  $k$  των παραπάνω εξισώσεων μπορεί να καθοριστεί αν είναι δοσμένα τα  $Y$  και  $C$ , πχ. στην περίπτωση που διαθέτονται δεδομένα για οκτώ έτη που αντιστοιχούν σε οκτώ άγνωστες τιμές του  $k$ . Γενικά, απαιτείται η χρήση της μεθόδου των ελαχίστων τετραγώνων. Τελικά ωστόσο, λαμβάνεται μία μεμονωμένη περιβαλλοντική παράμετρο, που αντιπροσωπεύει ένα μόνο κλιματικό στοιχείο.

Για οποιοδήποτε δοσμένο έτος, μπορεί να γίνει μία προσωρινή πρόβλεψη της παραγωγής χρησιμοποιώντας την εξίσωση της μεμονωμένης περιβαλλοντικής παραμέτρου για οποιοδήποτε στοιχείο.

Έστω  $(\Delta Y_e)C_a$  και  $(\Delta Y_e)C_b$  οι αποκλίσεις της προβλεπόμενης παραγωγής που θα οφείλονται στα στοιχεία  $C_a$  και  $C_b$  αντιστοίχως. Για το συγκεκριμένο έτος υπάρχει ένας συνδυασμός διαφορετικών στοιχείων, δηλαδή:

$$\Delta Y = a + b(\Delta Y_e)C_a + c(\Delta Y_e)C_b + d(\Delta Y_e)C_c \quad (4-16)$$

όπου  $C_a, C_b, C_c$ , κτλ οι διαφορετικοί παράγοντες. Θα εξετασθεί στη συνέχεια η φύση αυτών των παραγόντων στάθμισης (weighting factors).

Οι σταθερές της εξίσωσης (4-16) καθορίζονται με τη συνήθη μέθοδο πολλαπλής συσχέτισης. Αφού βρεθούν οι τιμές των σταθερών  $a, b, c$ , κτλ., λαμβάνεται μία εξίσωση πρόβλεψης. Οι εδαφικοί και κλιματικοί παράγοντες της εξίσωσης (4-13) μπορούν να διαχωριστούν σε θετικούς και αρνητικούς προκειμένου να διευκολυνθούν οι υπολογισμοί. Τα στοιχεία για τα οποία υπάρχει θετική συσχέτιση είναι οι εδαφικοί ή κλιματικοί παράγοντες που οδηγούν σε αύξηση της παραγωγής της καλλιέργειας, εντός κάποιων ορίων, κάποιες ποσότητες ή έντασης.

Για παράδειγμα, οι αυξημένες βροχοπτώσεις συνήθως αυξάνουν την παραγωγή. Ωστόσο, αν οι βροχοπτώσεις είναι υπερβολικά πολλές θα οδηγήσουν σε μείωση της παραγωγής· επομένως πρέπει να τεθεί ως όριο μία συγκεκριμένη ποσότητα βροχόπτωσης. Κάτω από αυτό το όριο, οι βροχοπτώσεις αποτελούν θετικό παράγοντα, ενώ πάνω από το όριο αρνητικό. Ομοίως, τα στοιχεία για τα οποία υπάρχει αρνητική συσχέτιση (είτε

εδαφικά είτε κλιματικά) οδηγούν σε μείωση της παραγωγής όταν αυξάνεται η ένταση των αρνητικών στοιχείων. Στις εξισώσεις (4-15) θα πρέπει να προστίθενται όλοι οι θετικοί παράγοντες, και να αφαιρούνται όλοι οι αρνητικοί.

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι οι σχέσεις καλλιέργειας-περιβάλλοντος συνήθως δεν είναι γραμμικές. Επομένως, η αναγκαστική χρήση γραμμικών εξισώσεων όπως οι (4-15) και (4-16), χρησιμεύει στην επίτευξη μιας πρώτης προσέγγισης του μη γραμμικού φαινομένου. Από την άποψη αυτή, είναι προτιμότερη η χρήση των εξισώσεων (4-12), (4-13) και (4-14), καθώς αυτές δεν είναι γραμμικές. Συνήθως, ο υπολογισμός μέσω πολυωνύμων και contingency tables, ο οποίος μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη μελέτη των σχέσεων καλλιέργειας-περιβάλλοντος, επίσης δεν είναι γραμμικός.

Κατά τρόπο ανάλογο με την προηγούμενη προσέγγιση, ο Glenday (1955) εφάρμοσε τη στατιστική μέθοδο της προσαρμογής των σταθερών για τη μελέτη των εβδομαδιαίων επιδράσεων του καιρού στην αύξηση βοσκότοπων. Τα δεδομένα προέρχονταν από τον Brougham (1955), που είχε σχεδιάσει δοκιμή στον αγρό η οποία βασιζόταν στην εναλλαγή σε σύντομο χρονικό διάστημα καλλιέργειας λευκού και κόκκινου τριφυλλιού.

Κάθε τεμάχιο της καλλιέργειας κοβόταν κατά εβδομαδιαία διαστήματα, για εννέα εβδομάδες συνολικά. Το κόψιμο ξεκίνησε σε τέσσερις διαδοχικές ημερομηνίες που απείχαν διάστημα μίας εβδομάδας η μία από την άλλη, όπως φαίνεται στον πίνακα 4.2. Ο σχεδιασμός αφορούσε τον πολλαπλασιασμό τόσο στο χρόνο όσο και στο χώρο. Οι μετρήσεις της μέγιστης και ελάχιστης θερμοκρασίας του αέρα, της θερμοκρασίας του εδάφους σε βάθος 4 ιντσών και του ύψους της βροχής είναι επίσης σε εβδομαδιαία διαστήματα ( $w$ ), ενώ η εβδομαδιαία ανάπτυξη ( $g$ ) που αντιστοιχεί σε κάθε διάστημα εκφράζεται σε ξηρή ύλη (σε λίβρες) ανά εκτάριο.

Το μαθηματικό μοντέλο του Glenday είναι:

$$Y_{i(j+1)k} = g_i + w_{(j+1)} + \dots + w_{(j+i)} + r_k + e_{i(j+i)} + e_{i(j+i)k} \quad (4-17)$$

όπου  $Y_{i(j+1)k}$  η παραγωγή του τεμαχίου για το στάδιο ανάπτυξης  $i$ , την τελική ημερομηνία  $j$ , και πολλαπλασιασμό  $r$ :

$g_i$  η συνεισφορά  $i$  διαστημάτων ανάπτυξης (περιλαμβανόμενου και του γενικού μέσου, καθώς η εξίσωση πρόβλεψης (prediction equation) για κάθε τεμάχιο περιέχει ένα μόνο  $g_i$ ):  $i = 1, \dots, I$ .

$w_{(j+1)} + \dots + w_{(j+i)}$  οι συνεισφορές καθενός διαστήματος του καιρού κατά το οποίο έλαβε χώρα η ανάπτυξη (σε κάθε εξίσωση εμφανίζονται  $i$  σταθερές του καιρού):  $j = 0, \dots, J$ .

$r_k$  η συνεισφορά του  $k$ -οστού πολλαπλασιασμού:  $k = 1, \dots, K$ .

$e_{i(j+i)}$  η συνεισφορά που είναι κοινή για όλους τους πολλαπλασιασμούς του  $i_{(j+i)}$ -οστού

$e_{i(j+i)k}$  η απόκλιση της τιμής από την ευθεία παλινδρόμησης που αντιστοιχεί στο συγκεκριμένο αγροτεμάχιο. (residual)

Αν οι πολλαπλασιασμοί είναι πλήρεις και διακριτοί, οι παράμετροι  $r$  της εξίσωσης (4-17) θα είναι κάθετοι στους υπόλοιπους. Αυτό σημαίνει ότι ο μέσος όρος αρκετών πολλαπλασιασμών μπορεί να εκφραστεί από ένα απλούστερο μοντέλο χωρίς το αποτέλεσμα να είναι λιγότερο γενικό. Έτσι:

$$Y_{i(j+1)} = g_i + w_{(j+1)} + \dots + w_{(j+i)} + e_{i(j+i)} \quad (4-18)$$

**Πίνακας 4.2** Ξηρό βάρος τριφυλλίου από σχέδιο δοκιμής στον αγρό το οποίο βασιζόταν στην εναλλαγή σε σύντομο χρονικό διάστημα καλλιέργειας λευκού και κόκκινου τριφυλλίου στην New Zealand.

Week of Cutting	Week of Closure			
	0	1	2	3
1	87			
2	443	184		
3	689	485	157	
4	1433	1186	676	237
5	2870	2580	2057	1612
6	3359	3475	2488	2134
7	4496	4516	3572	3035
8	6195	5527	4772	4211
9	6331	5847	5450	4855
10		6287	6214	5551
11			6907	6950
12				7497

After Brougham, 1955



Αυτό που πρέπει να γίνει στη συνέχεια, είναι να προσαρμοστεί το παραπάνω μοντέλο στα υπάρχοντα δεδομένα ελαχιστοποιώντας τη residual διακύμανση, δηλαδή το  $e_{i(j+i)}$ , μέσω μιας απλής διαδικασίας ελαχιστοποίησης με τη χρήση διαφορικού λογισμού. Άρα, η εξίσωση (4-18) γίνεται:

$$Y_{i(j+i)} = g_i + w_{(j+1)} + \dots + w_{(j+i)} \quad (4-19)$$

Η εφαρμογή της εξίσωσης (4-19) στο τέταρτο κόψιμο που αντιστοιχεί σε κάθε αρχική ημερομηνία του πίνακα 4.2 δίνει της εξής τιμές:

$$\begin{aligned} 1432 &= g_4 + w_1 + w_2 + w_3 + w_4 \\ 2580 &= g_4 + w_2 + w_3 + w_4 + w_5 \\ 2488 &= g_4 + w_3 + w_4 + w_5 + w_6 \\ 3035 &= g_4 + w_4 + w_5 + w_6 + w_7 \end{aligned}$$

Από το άθροισμα των παραπάνω εξισώσεων :

$$9536 = 4 g_4 + w_1 + 2 w_2 + 3 w_3 + 4 w_4 + 3 w_5 + 2 w_6 + w_7 \quad (4-20)$$

Στη δοκιμή αυτή, εφόσον  $I=9$  και  $J=3$ , μπορεί να εξαχθεί μία σειρά 21 κανονικών εξισώσεων, όπως φαίνεται στον πίνακα 4.3.

Το επόμενο βήμα είναι να απαλειφθεί μια σειρά παραμέτρων ώστε να μειωθεί ο αριθμός των μεταβλητών στους τελικούς υπολογισμούς. Έτσι, όπως φαίνεται στον πίνακα 4.4 προέκυψαν 12 εξισώσεις οι οποίες δίνουν την παράμετρο ( $w$ ) στον πίνακα (matrix notation)  $X_p=a$ .

Αν τεθεί ο περιορισμός  $w_s=0$ , οι εξισώσεις γίνονται

$$Y_q=b,$$

όπου  $Y$  ο συμμετρικός πίνακας  $11 \times 11$  που λαμβάνεται αν διαγραφεί η γραμμή και η στήλη  $s$  από τον  $X$ . Τα  $q$  και  $b$  είναι τα  $p$  και  $a$ , εφόσον διαγράφηκε το στοιχείο  $s$ . Η τελική λύση λοιπόν θα έχει ως εξής:

$$q = Y^{-1} b \quad (4-21)$$

Αν υποτεθεί ότι τίθεται ο γραμμικός περιορισμός  $\sum_{i=1}^{12} K_i w_i = 0$ , είναι δυνατόν

χωρίς να γίνει ο λογισμός λιγότερο γενικός, να ισχύει:

$$w_s = - \sum_{i=1}^{s-1} K_i w_i - \sum_{i=s+1}^{12} K_i w_i$$

Τότε, αντικαθιστώντας την τιμή του  $w_s$  και διαγράφοντας όπως και πριν τη γραμμή  $s$ , η εξίσωση γίνεται:

$$YZ_q = b \quad (4-22)$$

όπου  $Z$  ο παρακάτω πίνακας  $11 \times 11$

$$\begin{array}{cccc}
 1+K_1 & K_2 \dots\dots\dots K_{S-1} & K_{S+1} \dots\dots\dots K_{11} & K_{12} \\
 K_1 & 1+K_2 \dots\dots\dots K_{S-1} & K_{S+1} \dots\dots\dots K_{11} & K_{12} \\
 \hline
 K_1 & K_2 \dots\dots\dots K_{S-1} & K_{S+1} \dots\dots\dots 1+K_{11} & K_{12} \\
 K_1 & K_2 \dots\dots\dots K_{S-1} & K_{S+1} \dots\dots\dots K_{11} & 1+K_{12}
 \end{array}$$

Οι λύσεις θα προκύψουν από την εξίσωση

$$\mathbf{Zq} = \mathbf{y}^{-1} \mathbf{b} \quad (4-23)$$

δηλαδή το σύστημα:

$$\begin{array}{ccc}
 1+K_1 & K_2 \dots\dots\dots K_{12} & \\
 \hline
 K_1 & 1+K_2 \dots\dots\dots K_{12} & \\
 K_1 & K_2 \dots\dots\dots 1+K_{12} &
 \end{array} \quad \mathbf{q} = \mathbf{y}^{-1} \mathbf{b}$$

Αν αφαιρεθεί οποιοδήποτε ζεύγος εξισώσεων από αυτό το σύστημα, φαίνεται ότι οι λύσεις για το  $(w_i - w_j)$  είναι ανεξάρτητες των  $k$ , καθώς οι εξισώσεις (4-21) αντιστοιχούν στη μεμονωμένη περίπτωση όπου  $k_s=1$ , και όλα τα άλλα  $k$  είναι 0. Επομένως, οποιοσδήποτε γραμμικός περιορισμός δίνει τις ίδιες τιμές για τα  $w$  εκτός από μία σταθερά.

Αν τεθεί ο συνήθης γραμμικός περιορισμός οι εξισώσεις είναι όμοιες με αυτές του συστήματος (4-22), ώστε να μπορεί να χρησιμοποιηθεί οποιαδήποτε αναγνωρισμένη μέθοδος αντιστροφής του συμμετρικού πίνακα  $\mathbf{Y}$  ή του μη συμμετρικού γινόμενου  $\mathbf{YZ}$ . Κατ'αυτόν τον τρόπο μπορούν να ληφθούν τιμές του  $w$  με μηδενικό μέσο.

Η εφαρμογή αυτών των μεθόδων στον πίνακα 4.3 δίνει

$W_1=-464$	$q_1=439$
$W_2=-204$	$q_2=1068$
$W_3=-322$	$q_3=1770$
$W_4=-100$	$q_4=2494$
$W_5=662$	$q_5=3377$
$W_6=-201$	$q_6=4207$
$W_7=215$	$q_7=5073$
$W_8=380$	$q_8=6061$
$W_9=-338$	$q_9=6507$
$W_{10}=-199$	
$W_{11}=386$	
$W_{12}=185$	

οι τιμές του  $g_i$  προκύπτουν από την αντικατάσταση των τιμών του  $w$  στις εξισώσεις (A) ως (I) του πίνακα 4.3.

Αν επεκτείνει κάποιος την έκφραση των παραμέτρων και στα αρχικά  $y_{i(j+1)}$ , μπορεί να πάρει τα τυπικά σφάλματα για τις εκτιμήσεις του. Τα παραπάνω αποτελούν παραδείγματα των γραφικών, μαθηματικών και στατιστικών προσεγγίσεων που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για το συνδυασμό περιβαλλοντικών παραγόντων στις μελέτες αντίδρασης των καλλιεργειών, ή απλούστερα, παραδείγματα της «διαδικασία σύνθεσης».

Πίνακας 4.3 Κανονικές εξισώσεις.

4	1	1	1	1		$g_1$	=	665	(A)
4	1	2	2	2	1	$g_2$		3,216	(B)
4	1	2	3	3	2	$g_3$		6,066	(C)
4	1	2	3	4	3	$g_4$		9,536	(D)
4	1	2	3	4	4	$g_5$		14,128	(E)
4	1	2	3	4	4	$g_6$		17,502	(F)
4	1	2	3	4	4	$g_7$		21,024	(G)
4	1	2	3	4	4	$g_8$		25,206	(H)
4	1	2	3	4	4	$g_9$		27,022	(I)
1	1	1	1	1	1	$w_1$		25,903	(J)
1	2	2	2	2	2	$w_2$		55,903	(K)
1	2	3	3	3	3	$w_3$		87,569	(L)
1	2	3	4	4	4	$w_4$		122,320	(M)
1	2	3	4	4	4	$w_5$		118,788	(N)
1	2	3	4	4	4	$w_6$		109,669	(O)
1	2	3	4	4	4	$w_7$		98,213	(P)
1	2	3	4	4	4	$w_8$		82,594	(Q)
1	2	3	4	4	4	$w_9$		61,889	(R)
1	2	3	4	4	4	$w_{10}$		39,406	(S)
1	2	3	4	4	4	$w_{11}$		21,354	(T)
1	2	3	4	4	4	$w_{12}$		7,497	(U)

Πίνακας 4.4 Εξισώσεις οι οποίες δίνουν την παράμετρο (w)

27	15	4	-6	-6	-6	-6	-6	-6	-6	-3	-1	$w_1$	=	-20,753
15	35	13	-7	-8	-8	-8	-8	-8	-8	-6	-2	$w_2$		-24,453
4	13	28	-2	-5	-6	-6	-6	-6	-6	-5	-3	$w_3$		-18,273
-6	-7	-2	10	4	1							$w_4$		+ 6,313
-6	-8	-5	4	10	4	1						$w_5$		+11,668
-6	-8	-6	1	4	10	4	1					$w_6$		+ 5,138
-6	-8	-6		1	4	10	4	1				$w_7$		+ 9,546
-6	-8	-6			1	4	10	4	1			$w_8$		+ 9,260
-6	-8	-6				1	4	10	4	1		$w_9$		+ 4,300
-6	-8	-6					1	4	10	4	1	$w_{10}$		+ 5,122
-3	-6	-5						1	4	7	2	$w_{11}$		+ 6,166
-1	-2	-3							1	2	3	$w_{12}$		+ 2,966

#### 4.5. Τυποποίηση των διαδικασιών

Τα μαθηματικά μοντέλα για την συσχέτιση της ανάπτυξης της καλλιέργειας με τους κλιματολογικούς ή μετεωρολογικούς παράγοντες έχουν πολλούς σκοπούς,

Α. να είναι ικανά να υπολογίσουν την ημερομηνία ωρίμανσης ή την ημερομηνία κάποιου άλλου φαινολογικού σταδίου για συγκεκριμένο σχεδιασμό ή άλλους επιχειρησιακούς σκοπούς.

Β. να είναι ικανά να μεταφράσουν την επίδραση συγκεκριμένων μετεωρολογικών παραγόντων στην ανάπτυξη των καλλιεργειών

Γ. να εκτιμούν την αντίδραση της ανάπτυξης της καλλιέργειας σε συγκεκριμένους μετεωρολογικούς παράγοντες.

Τα περισσότερα μοντέλα περιλαμβάνουν σχέσεις θερμοκρασίας με τον ένα ή με τον άλλο τρόπο. Μερικά μοντέλα συμπεριλαμβάνουν τόσο την θερμοκρασία όσο και το μήκος της ημέρας σε μια προσπάθεια να ξεπεράσουν τα προβλήματα που ανακύπτουν όταν χρησιμοποιείται η θερμοκρασία μόνη της. Μερικά μοντέλα συνδυάζουν την ηλιακή ενέργεια με την θερμοκρασία σε μια προσπάθεια να προσμετρήσουν τόσο το μήκος της ημέρας όσο και την επίδραση της ηλιοφάνειας στην θέρμανση του φυτικού ιστού από την ambient θερμοκρασία του αέρα.

Σε άλλα μοντέλα χρησιμοποιείται η διάρκεια της έντονης ηλιοφάνειας όπως και η intensity. Ακόμη κάποια μοντέλα χρησιμοποιούν μόνο την καθαρή ακτινοβολία. Αυτό συμβαίνει γιατί θεωρείται ότι είναι η διαθέσιμη θερμοκρασία στην καλλιέργεια για λόγους ανάπτυξης. Οι τεχνικές που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή των μοντέλων και τον έλεγχο τους, ποικίλουν. Γενικά όμως το μεγαλύτερο μέρος τους είναι στατιστικού τύπου καθώς η ανάπτυξη της καλλιέργειας δεν ανταποκρίνεται σε μηχανιστικού τύπου μοντέλα σαν αυτά που χρησιμοποιούνται μερικές φορές στα μοντέλα παραγωγής-καιρού. Η κατασκευή μοντέλων για την επίδραση του καιρού στην ανάπτυξη της καλλιέργειας είναι γεγονός ότι μπορεί να απλοποιηθεί δίνοντας μεγαλύτερη βαρύτητα σε συγκεκριμένους βασικούς βιολογικούς παράγοντες του προβλήματος.

Η τυποποίηση των διαδικασιών συνδυάζει τις μεμονωμένες μεθόδους σε μία ενοποιημένη ακολουθία και διαμορφώνει έτσι μία απλή διαδικασία η οποία θα περιέχει όλες τις απαραίτητες πληροφορίες για ένα συγκεκριμένο πρόβλημα. Η ενοποιημένη ακολουθία μπορεί να είναι ακολουθία στο χρόνο ή στο χώρο ή και τα δύο ανάλογα με τη φύση του προβλήματος. Η απλοποιημένη διαδικασία περιλαμβάνει γραφήματα, nomograms, alignment charts, πίνακες και εξισώσεις, ή συνδυασμούς όλων αυτών. Ορισμένες φορές ένα απλό εργαλείο, όπως ένας ειδικός λογαριθμικός κανόνας ή ένα καντράν, μπορεί να είναι χρήσιμο. Από τη στιγμή που τυποποιούνται οι διαδικασίες, μπορούν να μας καθοδηγήσουν στην στατιστική και μαθηματική προσέγγιση.

Κάποιες θεμελιώδεις διαδικασίες, όπως αυτές περιγράφονται παρακάτω, μπορούν να καθοδηγήσουν τον ερευνητή στην προσέγγισή του. Οι διαδικασίες αυτές και η πρακτική εφαρμογή τους περιγράφονται στα αντίστοιχα κεφάλαια. Κατ'αρχήν, οι διαδικασίες θα πρέπει να ακολουθούν δύο οδούς: την φυσιολογική ανάπτυξη των καλλιεργειών σε σχέση με το χρόνο, και τις φυσικές αλλαγές του περιβάλλοντος που σχετίζονται με αυτές. Σε γενικές γραμμές μια σωστή διαδικασία περιέχει τα παρακάτω ερωτήματα



## I. Πώς διατυπώνεται το πρόβλημα;

A. Ποια είναι το είδος του προβλήματος;

1. Να αξιολογηθεί η καλλιεργήσιμη έκταση.
2. Να βελτιωθούν οι παραδοσιακές πρακτικές (άρδευση, λίπανση, αμειψισπορά, ψεκασμοί—εντομοκτόνα, μυκητοκτόνα, έλεγχος ζιζανίων κτλ.).
3. Να προληφθούν οι καιρικές απειλές.
4. Να ελεγχθεί το μικροκλίμα της καλλιεργήσιμης έκτασης.
5. Να μεταβληθεί η διαδικασία της παραγωγής έτσι ώστε να είναι το καταλληλότερο για τη διαχείριση της συγκομιδής και τη λειτουργία των εργοστασίων.
6. Να αποφασιστεί ο τρόπος αποθήκευσης και κατεργασίας των υλικών, έτσι ώστε να βελτιώνεται η ποιότητα.
7. Να γίνει πρόβλεψη του χρόνου ωρίμανσης της καλλιέργειας, της παραγωγής, της ποιότητας, κτλ.
8. Άλλα είδη προβλημάτων.

B. Πόσο μεγάλο ή μικρό είναι το πρόβλημα;

1. Καθορισμός των ορίων.
  - α. Στο φυσικό περιβάλλον—υλικά όρια
  - β. Στις βιολογικές αντιδράσεις—επιλογή των ενδεικτικών ορίων
2. Μέγεθος δείγματος (αριθμός ειδών και ποικιλιών καλλιεργειών συσχετισμένων με περιβαλλοντικούς τύπους).

Γ. Πώς πρόκειται να γίνει η ανάλυση του προβλήματος;

1. Χρησιμοποιώντας την υπόθεση της σταθερότητας των βιοτικών παραγόντων
2. Διατυπώνοντας το πρόβλημα με σαφή και ευκρινή τρόπο
3. Επιλέγοντας το πρόβλημα εξαιτίας των ιδιαίτερων χαρακτηριστικών του, εφόσον σκοπός είναι:
  - α. Να επιλεγεί ένα σχέδιο.
  - β. Να παρθεί μία λειτουργική απόφαση.
  - γ. Να ερμηνευθεί ένα γεγονός.

## II. Τί είδη δεδομένων είναι διαθέσιμα;

A. Ποια είναι η φύση του πρωτογενούς υλικού;

1. Φαινολογικά δεδομένα
2. Περιβαλλοντικά δεδομένα

B. Πόσο μεγάλη θα πρέπει να είναι η περίοδος για την οποία διαθέτονται στοιχεία ώστε να εξασφαλισθεί μία ικανοποιητική λύση;

Γ. Κατά πόσο είναι αντιπροσωπευτικά τα δεδομένα (αντιστοιχούν μόνο στο συγκεκριμένο σημείο, στην έκταση, ή την περιοχή);

Δ. Πόσο ακριβή είναι τα δεδομένα όσον αφορά την ένδειξη του χρόνου και την τοποθέτηση των μετρητών (πχ., πάνω στο φύλλο ή πάνω από το έδαφος);

### **III. Πώς πρόκειται να γίνει η ανάλυση των δεδομένων;**

Α. Μήπως τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά του φυσικού περιβάλλοντος επηρεάζουν τη χρησιμότητα των υπαρχόντων δεδομένων;

Β. Μήπως οι βιολογικοί και στατιστικοί περιορισμοί επιδρούν αρνητικά στα υπάρχοντα δεδομένα;

Γ. Απαιτείται να γίνουν εκτιμήσεις για τα δεδομένα τα οποία ήταν ανεπαρκή ή δεν είχαν παρατηρηθεί;

Δ. Απαιτείται η τροποποίηση των δεδομένων του περιβάλλοντος ή της καλλιέργειας;

Ε. Υπάρχουν διαθέσιμες λύσεις για ανάλογα κλιματολογικά προβλήματα;

ΣΤ. Απαιτείται ο συνδυασμός των περιβαλλοντικών στοιχείων; Αν ναι, ποια είναι αυτά, και ποιες είναι οι μεταξύ τους σχέσεις;

### **IV. Ποια είναι η διαδικασία που ακολουθείται για την πρώτη προσέγγιση της λύσης;**

Α. Θα πρέπει να εφαρμοστούν τεχνικές «διαλογής»

Β. Θα πρέπει να γίνει σύγκριση με το μοντέλο ανταπόκρισης των καλλιεργειών

Γ. Θα πρέπει να γίνει δοκιμή (ή επιλογή) με (ή από) διάφορες περιβαλλοντικές παραμέτρους

Δ. Θα πρέπει να προσδιοριστούν το στατιστικώς σημαντικό στοιχείο και η σημαντική περίοδος

Ε. Θα πρέπει να επιχειρηθούν δοκιμαστικά συμπεράσματα για την πρώτη προσέγγιση;

### **V. Πώς θα πρέπει να ληφθεί η τελική απόφαση;**

Α. Πώς διαφοροποιούν ποσοτικά τις μετρήσεις οι επιδράσεις του περιβάλλοντος στα φυτά στις διάφορες φάσεις;

1. Θετικά.
2. Αρνητικά.
3. Ουδέτερα.

#### 4. Γραμμικά ή μη γραμμικά.

**Β.** Πώς η κατάληξη είναι ο συνδυασμός των διαφόρων μεμονωμένων περιβαλλοντικών επιδράσεων στα διάφορα στάδια της ανάπτυξης;

1. Με αλγεβρικό άθροισμα (απλή πρόσθεση ή όχι)
2. Με μαθηματικές διατυπώσεις.
3. Με γραφική λύση, ιδίως προβολές τρισδιάστατων εννοιών

Ανακεφαλαιώνοντας, οι στατιστικές και μαθηματικές μέθοδοι εφαρμόζονται στην αγρομετεωρολογία από το 1920. Αυτές οι μέθοδοι, όπως καθιερώθηκαν από τον Fisher, έχουν χρησιμοποιηθεί σε τεράστιο αριθμό στατιστικών που αφορούν τη σχέση καλλιεργειών-καιρού. Ωστόσο, μόνο πρόσφατα έγινε δυνατή η καλύτερη μέτρηση του μικροπεριβάλλοντος, εξαιτίας των σύγχρονων εξελίξεων στη χρήση της στατιστικής στη γεωργία.

Σε αυτή τη νέα φάση ανάπτυξης, θεμέλιο της αγρομετεωρολογίας αποτελεί η ακριβέστερη παρατήρηση των φαινολογικών συμβάντων, καθώς και του φυσικού περιβάλλοντος. Προσοχή! Οι στατιστικές μέθοδοι δεν είναι παρά εργαλεία. Η επιτυχής χρήση τους προϋποθέτει την βαθιά γνώση των φυσικών νόμων και των αρχών της φυσιολογίας.

Η μεθοδολογική συστηματική προσέγγιση περιλαμβάνει δυο μεγάλες κατηγορίες μοντέλων,

- τα αιτιοκρατικά ή προσδιοριστικά μοντέλα και
- τα λεγόμενα στοχαστικά μοντέλα.

## 4.6 Βιβλιογραφία Κεφαλαίου 4

1. Alexander, C. W., and D. E. McCloud. 1962: CO<sub>2</sub> uptake (net photosynthesis) as influenced by light intensity of isolated bermudagrass leaves contrasted to that of swards under various clipping regimes. *Crop Sci.* 2 (2) :132-135.
2. Anderson, P. J. 1953. Growing tobacco in Connecticut. *Bull.* 564. Connecticut Agr. Expt. Sta., New Haven. 110 pp.
3. Angstrom, A. 1936. A coefficient of humidity of general applicability. *Geograf. Ann.* 18: 245-254.
4. Azzi, G. 1956. *Agricultural ecology*. Constampl and Company. Ltd London 424 pp.
5. Baker, G. A., and L. D. Davis. 1951: Growth of the cheek diameter of peaches. *Proc. Am. Soc. Hort. Sci.* 57: 104-110.
6. Beattie, J.H., and W.R. Beattie. 1942. Production of tomatoes for canning and manufacturing. U. S. Dept. Agr. Farmers' Bull. No. 1901. 37 pp.
7. Brougham, R. W. 1955. A study in rate of pasture growth. *Australian J. Agr. Research* 6: 804-812.
8. Brown, H. D. and Hutchinson. 1949: *Vegetable science*. J.B. Lippincott Co., Philadelphia, London, Chicago. 452 pp.
9. Conrad, V., and L. W. Pollak. 1950: *Methods in Klimatology*. 2<sup>nd</sup> ed. Harvard University Press Cambridge Mass. 459 pp.
10. De Martonne, E. M. 1966. Une nouvelle fonction climatologique: L'indice d'aridité (A new climatological function: aridity index). *Meteorologie* 2: 449-458. (in French)

11. Dmitrenko VP 1976: Assessment of impact of air temperature and precipitation on yield formation of major cereal crops. Guidebook. Hydrometeoizdat, Leningrad, 48 pp.
12. Ehler, J. H. 1915. The temperature of leaves of Pinus in winter. *Am. J. Botany* 2 ( 1 ): 32-70.
13. Garoian, L., and W.F. Mueller. 1958. Wisconsin canning crop statistics. Dept. Agr. Econ., Univ. Wisconsin (Special publication). 20 pp.
14. Glenday, A. C. 1955. The mathematical separation of plant and weather effects in field growth studies. *Australian J. Agr. Research* 6: 813-822.
15. Kincer, J. B. 1915. A correlation of weather conditions and production of cotton in Texas. *Monthly Weather Rev.* 43 (2): 61-65.
16. Koppen, W. 1936. Das Geographische System der Klimate (The geographical system of climate). In *Handbuch der Klimatologie* Vol. 1, Part C. 44 pp.
17. Lancashire, E.R., T. H. Parks, and A. L. Pierstorff. 1935. Tomatoes for canning. Ohio State Univ. Agr. Coll. Ext. Serv. Bull. 114. 31 pp.
18. Landsberg, H. E. , and W. C. Jacobs. 1951. Applied climatology. In T. F. Malone, ed. *Compendium of meteorology*. Am. Meteorol. Soc., Boston, Mass. pp. 976-992.
19. Lang, R. 1920: Verwitterung und Bodenbildung als einfuehrung in die Bodenkunde (weathering and soil formation for better understanding in soil sience). Stuttgart. 188 pp.
20. Leith, B. D., A. J. Lejenne, and J. H. Parker. 1952. Data of planting and yields of oderbrucker barley in field plots, Wisconsin Agricultural Experiment Station, Madison, 1899- 1950. *Brewers J.* (Jan. 1952). 4 pp.
21. Mescherskaya AV, Boldyreva NA, Shavaeva ND 1982: Mean regional reserves of productive moisture in soil and height of snow cover. Statistical analysis and examples of use. Hydrometeoizdat Leningrad, 243 pp.
22. Meyer, A. 1926: Some relationships between climate and soil in Europe. *Chem, der Erde* 2 : 209(?) -347.
23. Noffsinger, T. L. 1962: World population and maximum crop yield. In S. W. Tromp *Biometeorology*. Pergamon Press (Oxford) pp. 461-470.
24. Nuttonson, M. Y. 1955: Wheat – climate relationships and the use of phenology in ascertaining the thermal and photo-thermal requirements of wheat. *Am. Inst. Crop Ecol.* 388 pp.
25. Obukhov VM 1949: Yield and meteorological factors. Gosplanizdat, Moscow, 316 pp.
26. Podolskii, A. S. 1958. A new method for phenological prognosis and Agroclimatic appraisal using the heat factor. *Doklady Akad. Nauka SSSR*.
27. Polevoy AN, Myzina TI, 1976: Methodological guidance on compiling an agrometeorological forecast of region-averaged yield of spring barley in the Nechernozemnyz zone of the European part of USSR. Hydrometeoizdat Moscow, 39 pp.
28. Porte, W. S. 1959 : Commercial production of tomatoes. U. S. Dept. Agr. Farmer's Bull. No 2045, 46 pp.
29. Satyr ZA, 1973: Two-factor optimisation model weather-yield. *Collect Works IEM* 3(40): 109-114 pp.



30. Seeley, D. A. 1977: Relation between temperature and crops. *Monthly Weather Rev.* 45(7) : 354-359.
31. Setzer, J. 1946: A new formula for precipitation effectiveness. *Geograph. Rev.* 36: 247-263.
32. Sirotenko OD, 1969: Multidimensional regression analysis as a method of studying the relationship of yield of agricultural crops and hydrometeorological factors. *Meteorol Hydrol* 12:68-87 pp.
33. Sirotenko OD, 1971: Component analysis in prognostic tasks of agrometeorology. *Methodological guidelines*. Hydrometeoizdat Moscow, 53 pp.
34. Smith, J. W. 1920: *Agricultural meteorology. The effect of weather on crops*. The Macmillan Co. New York. 304 pp.
35. Thornthwaite, C. W. 1931: The climates of North America according to a new classification. *Geograph. Rev.* 21: 635-655.
36. Thornthwaite, C. W. 1948: An approach toward a rational classification of climate. *Geograph. Rev.* 38(1): 56-94.
37. Transeau, E. N. 1905: Forest centers of Eastern America. *Am. Naturalist* 39: 875-889.
38. Ulanova ES, 1963: A method for long-term prediction of agrometeorological conditions for formation of winter wheat yield. *Meteorol Hydrol* 11:12-30.
39. Ulanova ES, 1975: *Agrometeorological conditions and yield of winter wheat*. Hydrometeoizdat, Leningrad, 302 pp.
40. Ulanova ES, 1977: *Methodological guidelines on compiling long-term forecasts of winter wheat yield in the main areas of cultivation of this crop*. Hydrometeoizdat, Leningrad 48 pp.
41. Ulanova ES, Zabelin VN 1990: *Methods of correlation and regression analysis in Agrometeorology*. Hydrometeoizdat, Leningrad, 207 pp.
42. Wang, J. Y. 1958: An evaluation of some techniques in Agrometeorology. ( *Methods relating to problems in cultivated plants* ). Ph D. thesis Univ. Wisconsin Madison 172 pp.
43. Wang, J. Y. 1960: A critique of the heat unit approach to plant response studies. *Ecology* 41: 785-791 pp.
44. Wang, J. Y. 1961: The phyto-climate of Wisconsin. 3. Moisture. Part A. Rainfall normals and hazards. *Research Rept. 7-A Agr. Expt. Sta. Univ. Wisconsin Madison* 64 pp.
45. Wang, J. Y. 1962a: The influence of seasonal temperature ranges on pea production. *Proc. Am. Soc. Hort. Sci.* 80:436-448.
46. Wang, J. Y. 1962b: Methods of crop response studies (emphasis on thermal effects). *Agron. J.* 54(5).
47. Wang, J. Y. 1962c. *Observational manual of vegetable phenology*. Research Rept. No 9. Agr. Expt. Sta. Univ. Wisconsin Madison 14 pp.
48. Wang, J. Y. 1963: A graphical solution on temperature – moisture response of tomato yield. *Proc. Am. Soc. Hort.* Vol. 81.
49. Wang, J. Y. 1963: *Crop response studies. I. Vegetable canning crops*. Dept. Meteorol. Univ. Wisconsin Madison Wisconsin 350 pp.
50. Wang, J. Y. and H. H. Bomalanski 1958: Objective methods correlating various moisture factors to yield and quality of Alaska peas. 31 pp.

51. Wang, J. Y. and R. A. Bryson, 1956: A study of phytometeorological effects on the growth and development of peas. Dept. Meteorol. Univ. Wisconsin Madison, 165 pp.
52. Wang, J. Y. and K. Nakamura 1960: Thermal response of sweet corn. Dept. Meteorol. Univ. Wisconsin, Madison, 17 pp.
54. Wang, J. Y. and H. Singh, 1961: Yield response of cucumber to rainfall. Dept. Meteorol. Univ. Wisconsin, Madison, 12 pp.
55. Wang, J. Y. and T. W. Tibbits, 1958: Methods for the determination of the water requirements of tobacco. Dept. Meteorol. Univ. Wisconsin, Madison, 25 pp.
56. Wang, J. Y. 1967. Crop prediction without weather forecasting. Proceeding the XVII International Horticultural Congress 4: 49-62.
57. Went, F. W. 1957: The experimental control of plant growth. Chronica Botanica Co., Waltham, Mass. 343 pp.
58. Westwood, M. N. and L. P. Batjer. 1959: The use of fruit weight during pit hardening to predict the harvest size of Elberta and J.H.Hale peaches. Proc. Wash. State Hort. Assoc. 55: 111-113.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5. ΑΙΤΙΟΚΡΑΤΙΚΑ Η ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΤΙΚΑ ΜΟΝΤΕΛΑ

Όπως προαναφέρθηκε στην εργασία αυτή τα πρόσφατα μοντέλα ανάπτυξης και οι επιδιώξεις τους όπως παρουσιάζονται διαχωρίζονται σε δύο μεγάλες ομάδες, τα στοχαστικά και τα προσδιοριστικά μοντέλα. Ειδικότερα τα προσδιοριστικά μοντέλα μπορούν να χωριστούν σε τρεις ομάδες: Τα στατιστικά, τα μηχανιστικά και τα συναρτησιακά μοντέλα.

Τα στοχαστικά μοντέλα χαρακτηρίζονται από αβεβαιότητα όσο αφορά το εισαγόμενο πακέτο στοιχείων, το εύρος των μεταβλητών καθώς και την συνολική παραγωγή. Συμπεριλαμβανομένου του μεγάλου ευμετάβλητου των παραμέτρων ή της διαδικασίας τιμών, η συμπεριφορά της φυτικής ανάπτυξης και αύξησης είναι περισσότερο στοχαστική παρά προσδιοριστική. Παρ' όλα αυτά σήμερα κυρίως τα προσδιοριστικά μοντέλα χρησιμοποιούνται για πρόγνωση παραγωγής.

### 5.1 Αιτιοκρατικά ή προσδιοριστικά μοντέλα

Στα προσδιοριστικά μοντέλα για ένα πακέτο από εισαγόμενα στοιχεία μόνο ένα αποτέλεσμα λαμβάνεται ως εξαγόμενο. Θα πρέπει επίσης να αναφερθεί ότι ένα ενδιάμεσο βήμα μπορεί να συμπεριληφθεί με την ολοκληρωμένη σημασία της κατάστασης των μεταβλητών στα προσδιοριστικά μοντέλα λαμβάνοντας υπ' όψη τον χρόνο ή το διάστημα της μεταβλητότητας. Όπως προαναφέρθηκε τα προσδιοριστικά μοντέλα χωρίζονται σε 3 ομάδες:

**5.1.1 Στατιστικά μοντέλα.** Τα μοντέλα αυτά παραμένουν τα πρώτα που χρησιμοποιούνται για μεγάλου επιπέδου εκτιμήσεις. Τα στατιστικά μοντέλα εκμεταλλεύονται τον κανόνα που λέει ότι η περιοχή της καλλιέργειας αρχίζει να είναι σχετικά σταθερή από χρόνο σε χρόνο και είναι λογικά πρόθυμη να εκτιμηθεί με άλλες πληροφορίες όπως οι φαινολογικές μετρήσεις της φυτικής αύξησης ή το μέγεθος της παραγωγής προηγούμενων χρόνων.

Καλά αποτελέσματα αναμένονται στα χρόνια που θεωρούνται φυσιολογικά και όχι σ' αυτά που επικρατούν ακραίες καταστάσεις. Τα μοντέλα αυτά είναι έγκυρα μέχρι τα όρια της περιοχής για την οποία αναπτύχθηκαν και εφαρμόστηκαν.

Οι αγροκλιματικές μέθοδοι πρόγνωσης παραγωγής ανήκουν σ' αυτή την ομάδα αφού παρουσιάζουν ομοιότητα και έχουν το πλεονέκτημα της μικρότερης εξάρτησης από εξειδικευμένη συλλογή στοιχείων από τον αγρό. Η εισαγωγή των δορυφορικών δεδομένων στα στατιστικά μοντέλα αποτέλεσε την εγκαθίδρυση σχέσεων μεταξύ της βιομάζας ή παραγωγής και του χρόνου συσσώρευσης του δείκτη βλάστησης καθώς και άλλων δεικτών.

**5.1.2 Μηχανιστικά μοντέλα.** Σ' αυτά τα μοντέλα μια μαθηματική τυποποίηση προσδιορίζεται από τους μηχανισμούς της διαφορετικής διαδικασίας αύξησης και ανάπτυξης για να φτάσει σε εκτίμηση παραγωγής. Οι κύριες διαδικασίες έχουν οριστεί στη βάση στιγμιαίων αναλογιών οι οποίες συνδέθηκαν με τις εκθετιμένες μεταβλητές χρησιμοποιώντας τόσο εισαγόμενα όσο και εξαγόμενα

δεδομένα. Γενικά η αύξηση και η ανάπτυξη του φυτού συμπεριλαμβάνονται χωριστά.

**5.1.3 Συναρτησιακά μοντέλα.** Αυτά τα μοντέλα προσδιορίζουν τις ίδιες διαδικασίες όπως τα μηχανιστικά μοντέλα αλλά με έναν πιο πολύπλοκο τρόπο, αφού κάποιες λεπτομέρειες τυποποίησης αντικαταστάθηκαν από εμπειρικές μεθόδους. Τα αποτελέσματα αυτών των μοντέλων συνήθως χρειάζεται πολύ λιγότερα εισαγόμενα στοιχεία γεγονός που σημαίνει σημαντικές μετατροπές στο χρόνο υπολογισμού.

## 5.2 Στατιστικά και μηχανιστικά μοντέλα

Τα μοντέλα αυτά ήταν και παραμένουν τα πρώτα που χρησιμοποιήθηκαν για μεγάλου επιπέδου εκτιμήσεις. Αυτό συνέβη διότι έχουν σχετικά απλή σχεδίαση και μικρό αριθμό εισαγόμενων στοιχείων που είναι απαραίτητα για να δουλέψουν αυτά τα μοντέλα.

Τα στατιστικά μοντέλα αποτελούνται από απλές ή πολλαπλές (κυρίως γραμμικές) παλινδρομήσεις μεταξύ δεδομένων παραγωγής και παραμέτρους της μέσης αντιστοιχίας του χώρου από τον οποίο πάρθηκαν τα δείγματα. Τα μοντέλα της κατηγορίας αυτής είναι έγκυρα, ισχύουν, μόνο μέσα στα όρια του χώρου για τον οποίο ετοιμάσθηκαν καθώς και στην ποικίλη μεταβολή των εισαγόμενων στοιχείων που χρησιμοποιήθηκαν για να δημιουργήσουν την σχέση. Εξ' αιτίας αυτού η διαστημική και χρονική επέκταση της ισχύος είναι σπάνια πιθανή.

Στο δεύτερο και κυρίως στο τρίτο κεφάλαιο αναφέρθηκαν με λεπτομέρειες μοντέλα που ανήκουν στην κατηγορία αυτή. Ο Satyr (1973) περιέγραψε την σχέση μεταξύ θερμοκρασίας αέρα, υγρασίας εδάφους και παραγωγής βιομάζας, σαν έναν << ασύμμετρο λόφο >>. Το σημείο στην κορυφή αυτού του λόφου αντιπροσωπεύει τον βέλτιστο συνδυασμό των παραπάνω παραγόντων. Αυτός ο λόφος περιγράφηκε με την βοήθεια μιας bivariate log-normal κατανεμημένης φόρμουλας στην οποία πέντε παράμετροι δημιουργήθηκαν με εξάρτηση από τις φάσεις της φυτικής ανάπτυξης.

Ο Dmitrenko το 1976 πρότεινε το γνωστότερο στατιστικό μοντέλο. Σχεδιάστηκε για τον υπολογισμό και την πρόβλεψη αποδόσεων των χειμερινών σιτηρών, της σίκαλης, του ανοιξιάτικου κριθαριού, του καλαμποκιού, της πατάτας, του ζαχαρότευτλου και του ηλιανθου.

Ο τύπος που χρησιμοποιήθηκε για να εκφράσει την σχέση μεταξύ εκτίμησης απόδοσης χειμερινών σιτηρών και των παραγόντων που επιδρούν είναι ο εξής

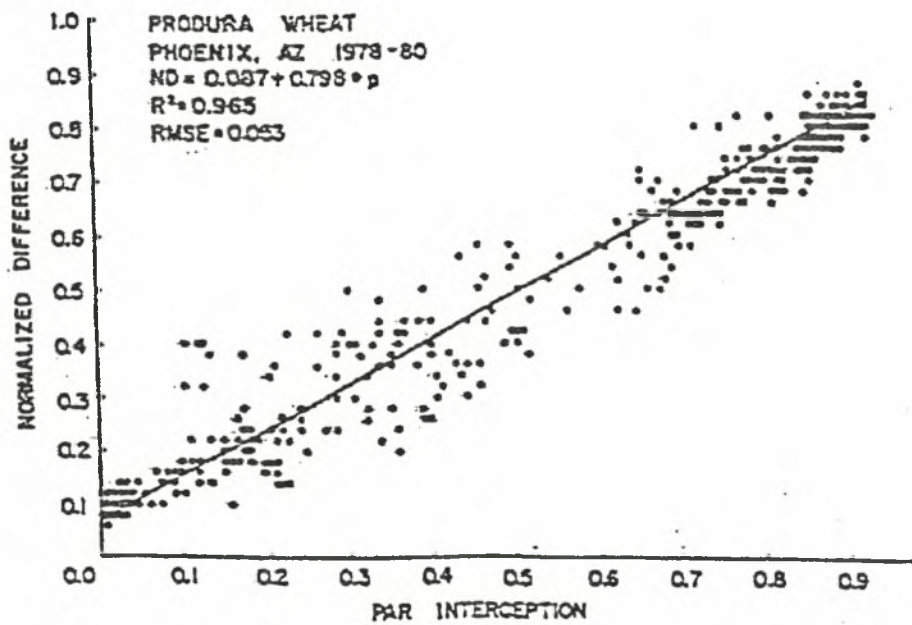
$$Y = Y_i (1-P) f(k)_{n8} (w)_{a8} + \sum_{i=1}^n n_i (T_i)_{n_i} \cdot (R_i)_{a_i} \quad (5-1)$$

όπου  $Y$  – το ετήσιο μέγιστο απόδοσης

$P$  – η φυτική πυκνότητα

$f(k)$  – ο δείκτης καλλιέργειας





**Σχήμα 5.1** Σχέση μεταξύ κανονικοποιημένης διαφοράς του φασματικού δείκτη και παρεμπόδιση του PAR για σκιαζόμενο ανοιξιότικο σιτάρι σύμφωνα με τον Hatfield.

$n_i (T)$ ,  $n_i \cdot (R)$ ,  $n_8 (w)$  – οι λειτουργίες φυτικής παραγωγής για την θερμοκρασία του αέρα  $T$ , την βροχόπτωση  $R$  και τα αποθέματα νερού  $w$  στην αρχή της φυτικής ανάπτυξης

$i$  – ο αριθμός υποπεριόδων της καλλιεργητικής περιόδου

Αυτές οι συναρτήσεις είναι κωδωνοειδούς διαμόρφωσης και ποικίλουν από το 0 έως το 1.

Η εισαγωγή των δορυφορικών δεδομένων στα στατιστικά μοντέλα συχνά αποτέλεσε την έναρξη σχέσεων μεταξύ της βιομάζας της παραγωγής και του χρόνου συσσώρευσης του δείκτη βλάστησης. Σήμερα τα στατιστικά μοντέλα εγκαταλείπονται όλο και περισσότερο για χάρη των μηχανιστικών ή συναρτησιακών μοντέλων.

Αυτός ο τύπος μοντέλων είναι πολύ χρήσιμος για να δείξει τις σχέσεις μεταξύ των παραμέτρων ή των διαδικασιών που εμπλέκονται στην αύξηση της φυτικής ανάπτυξης και στις περιβαλλοντικές παραμέτρους. Ένα παράδειγμα είναι η γραμμική σχέση μεταξύ ικανότητας παρεμπόδισης της ακτινοβολίας από φωτοσυνθετική δράση και του NDVI όπως παρουσιάζεται στο σχήμα 5.1. Η σχέση αυτή καθώς και η σχέση μεταξύ φωτοχημικής ικανότητας του συνόλου του  $T_s - T_a$  είναι χρήσιμες στην δημιουργία συναρτησιακών και σε μικρότερη έκταση μηχανιστικών μοντέλων.

Ενδιαφέρον είναι να αναφερθούν απλώς κάποια μοντέλα αυτής της κατηγορίας. Ένα απλό στατιστικό μοντέλο εφαρμόστηκε στην πρόγνωση παραγωγής ρυζιού και καλαμποκιού στην Ελλάδα. Παρομοίως ένα αγρομετεωρολογικό μοντέλο εφαρμόστηκε και στην Ιταλία. Αρκετοί μετεωρολογικοί δείκτες βρέθηκαν να είναι κινητήριες δυνάμεις για παρακολούθηση ρυζιού και καλαμποκιού στην Ελλάδα χρησιμοποιώντας συντελεστή ανάλυσης σε διάφορα φαινολογικά στάδια.

Άλλο ένα απλό μοντέλο έχει εφαρμοστεί για πρόγνωση παραγωγής στην πατάτα και είναι βασισμένο στην έμμεση ακτινοβολία του φωτός την θερμοκρασία και την ξηρασία. Στην Ν.Α. Αλβανία επίσης εφαρμόστηκε επιτυχώς ένα σιτάρι – παραγωγή – καιρός, μοντέλο. Η απόφαση για ένα βοηθητικό σύστημα για ένα πρόγραμμα χημικού ελέγχου του late bright της πατάτας αναπτύχθηκε και εφαρμόστηκε στις Σκανδιναβικές χώρες με επιτυχία και ήταν βασισμένο σε μετεωρολογικά στοιχεία.

Στην Γερμανία ένα μοντέλο το AMBER αναπτύχθηκε για ημερήσια πρόγνωση για το έγκαυμα των μήλων χρησιμοποιώντας την φυλλική υγρασία και τη θερμοκρασία με σκοπό να προσδιορίσει τον βαθμό υποθετικού κινδύνου από μόλυνση. Τέλος ένα απλό μοντέλο για πρόληψη στην αναπαραγωγική διαδικασία του αβοκάντο βασίστηκε σε ημεροβαθμίδες.

Τα μηχανιστικά μοντέλα με την σειρά τους, είναι μερικές από τις πιο σύγχρονες μεθόδους για την προσομοίωση διαφορετικών διαδικασιών αύξησης και ανάπτυξης που οδηγούν στην πρόγνωση της παραγωγής. Στα μοντέλα αυτά είναι φανερό η προσπάθεια για τυποποίηση των μοντέλων. Όπως προαναφέρθηκε, η προσπάθεια αυτή εξαρτάται από τις ισχύουσες γνώσεις και τους μηχανισμούς των διαφορετικών διαδικασιών αύξησης και ανάπτυξης για να υπάρχει το αποτέλεσμα της σωστής πρόγνωσης για σημαντική απόδοση.

Τα περισσότερα από τα μοντέλα ανάπτυξης έχουν κατασκευαστεί από δυο ή τρία μέρη (φυτό – ατμόσφαιρα ή έδαφος – φυτό – ατμόσφαιρα) και η κύρια διαδικασία είναι γύρω από τον ίδιο βασικό συνδυασμό (σχήμα 5.9). Η κύρια διαδικασία (φωτοσύνθεση, αναπνοή, αφομοίωση τεμαχιδίων)

είναι καθορισμένη στη βάση των στιγμιαίων αναλογιών με την βοήθεια ορισμένων προσδιοριστικών εξισώσεων.

Οι αναλογίες αυτές είναι συνδεδεμένες με μεταβλητές καθορισμένης περιγραφής της σκιάς δομής (περιοχή φύλλου, δείκτης, ηλικία οργάνων και προσανατολισμός των φύλλων ) καθώς και με το έδαφος (χρήσιμα αποθέματα σε νερό ). Αυτές οι μεταβλητές του πεδίου έχουν εισαχθεί και αναπροσαρμοσθεί με την βοήθεια εισηχθέντων στοιχείων όπως η βροχόπτωση, η ακτινοβολία, η ποσότητα CO<sub>2</sub>, και η ελάχιστη θερμοκρασία βλάστησης.

Οι αναλογίες αυτές έχουν επαναυπολογισθεί και αναπροσαρμοσθεί πάνω σε κάθε υπολογισμό χρονικού βήματος (κυρίως μεταξύ 15' και μιας ημέρας ) και είναι εξαρτώμενες από τις αλλαγές στις μεταβλητές. Η τελική απόδοση των αποτελεσμάτων προέρχεται από την ενοποίηση των αναλογιών όλου του κύκλου των φυτών.

Η αύξηση και η ανάπτυξη των φυτών έχουν μελετηθεί ξεχωριστά. Η αύξηση εξαρτάται από την ποσότητα της ηλιακής ακτινοβολίας που παρεμποδίζεται, καθώς και από την αφομοίωση του άνθρακα. Η ηλιακή ακτινοβολία που παρεμποδίζεται κανονικά εκτιμάται τοποθετώντας στις ανάλογες εξισώσεις, την περιοχή του φύλλου η οποία μπορεί να παρεμποδίζει την ακτινοβολία καθώς και την ακτινοβολία η οποία εξαφανίζεται στην σκιά. Η ποσότητα του άνθρακα που συσσωρεύθηκε στα όργανα τα οποία θα συγκομισθούν εξαρτάται από τις απώλειες που οφείλονται στην αναπνοή καθώς και τις ποικίλες παρενοχλήσεις των μηχανισμών που οφείλονται στην παρέμβαση της πίεσης.

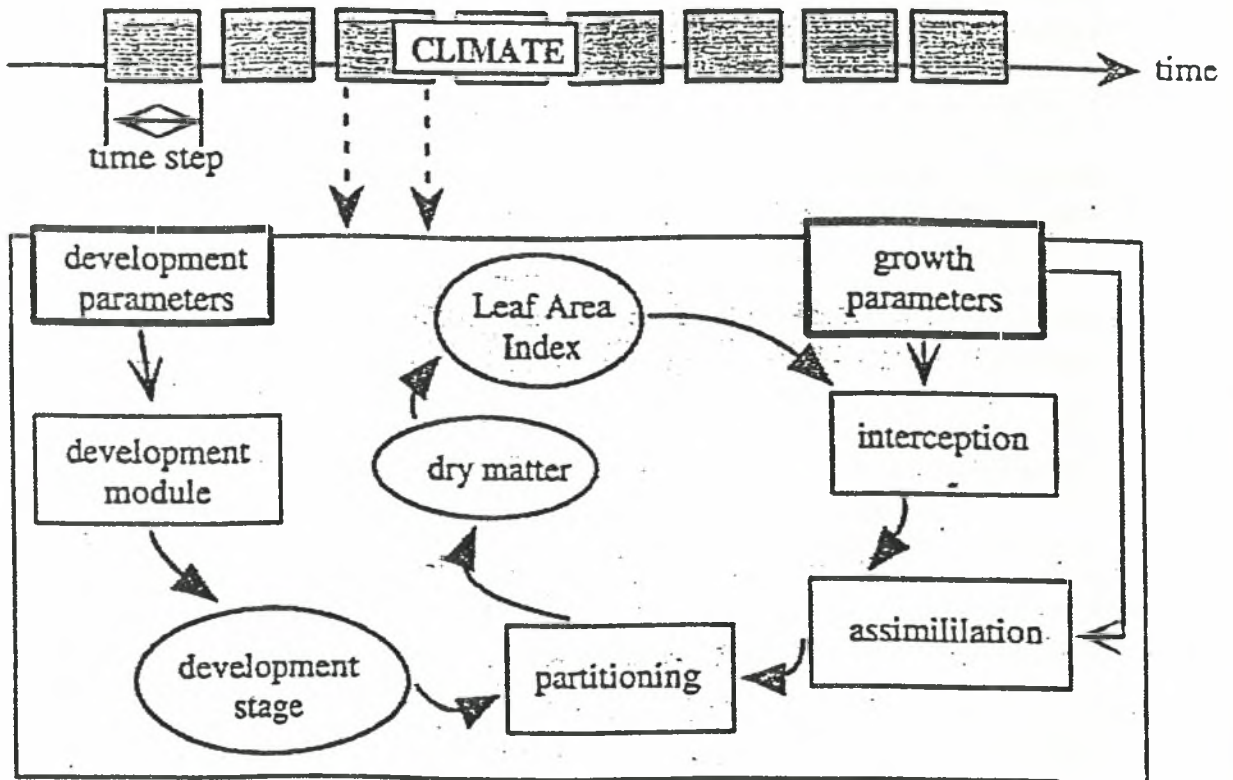
Όσο αφορά την ανάπτυξη υπάρχει μια προσπάθεια για τον προσδιορισμό της διόδου μεταξύ των διαφορετικών φαινολογικών φάσεων ( σπορά, εμφάνιση, άνθηση, ωρίμανση, κτλ ). Αυτά τα στάδια είναι χρήσιμα για τον προσδιορισμό των τυποποιήσεων των τεμαχιδίων που αφομοιώνονται στα διάφορα όργανα. Σε αυτό το κομμάτι επίσης τυποποιείται η μορφολογική ανάπτυξη ( αρχίζοντας από την ανάπτυξη, τον χρόνο ζωής του φύλλου, κτλ. ). Όλες αυτές οι παράμετροι έχουν κυρίως εκφρασθεί σαν μια λειτουργία των αθροισμάτων θερμοκρασίας και διαθεσιμότητας νερού.

Πολλές λεπτομέρειες που αφορούν τις μεθόδους προσδιορισμού της αύξησης και της ανάπτυξης καθώς επίσης και την προσέγγιση στην διαδικασία απόδοσης αναφέρονται από τους Charles-Edwards (1984), Penning De Vries (1989) και Ritchie (1992).

Αυτός ο τύπος μοντέλου είναι ιδανικό εργαλείο για την βοήθεια στην κατανόηση της διαδικασίας όπως προέρχεται από τον έλεγχο, για παράδειγμα, των υποθέσεων όπως κλιματικές αλλαγές και τροποποίηση μοντέλου αύξησης της ρίζας.

Για τον έλεγχο των αποτελεσμάτων με τον καλύτερο τρόπο, όλες οι σταθερές και οι μεταβλητές πρέπει να έχουν παραμετροποιηθεί για μια ρίζα, ένα είδος, μιας δοσμένης ποικιλίας και ενός ομογενούς τεμαχιδίου γης. Για παράδειγμα στο WOFOST ένα από τα μοντέλα προσομοίωσης της παραγωγής, 170 παράμετροι πρέπει να προσμετρηθούν για κάθε είδος φυτού. Σε αυτό πρέπει να προστεθούν και μετρήσεις ατμοσφαιρικών και εδαφικών τμημάτων.

Εξ' αιτίας των υψηλών απαιτήσεων σε στοιχεία – και συχνά στην πραγματικότητα δεν υπάρχει πρόσβαση σε μερικά από αυτά – η απλοποιημένη προσέγγιση ανήκει στο παρελθόν.



Σχήμα 5.9 Απλοποιημένο διάγραμμα ενός προσδιοριστικού μηχανιστικού μοντέλου.



Παρακάτω αναφέρονται ενδεικτικά ορισμένα μηχανιστικά μοντέλα και φυτά η χώρες στις οποίες εφαρμόζονται.

Μια τελευταία προσπάθεια γίνεται στην Ελλάδα και την Ισπανία για την προσαρμογή ενός μοντέλου αύξησης, του GOSSYM, για την προσομοίωση στο βαμβάκι. Μια συγκριτική μελέτη άρχισε επίσης μεταξύ των μοντέλων προσομοίωσης στην παραγωγή ρυζιού η οποία συμπεριλαμβάνει και την περιβαλλοντική δραστηριότητα. Επίσης ένα απλό μηχανιστικό μοντέλο εξελίχθηκε και αξιοποιήθηκε για την πρόγνωση της πραγματικής παραγωγής grassland στην Σουηδία.

Τελευταία ένα αγρομετεωρολογικό σύστημα πρόγνωσης, το AMBER, εξελίχθηκε στην Γερμανία και είναι ένα αποφασιστικό βοηθητικό σύστημα για σημαντικά επίπεδα αγρομετεωρολογικών πληροφοριών. Επίσης ένα τέτοιο μοντέλο αναπτύχθηκε και για το σόργο σαν βιομηχανικό φυτό πολλά υποσχόμενο που είναι. Μια πρόσφατη εξέλιξη επιτρέπει την μοντελοποίηση των σταδίων της αύξησης στην παραγωγή σταφυλιών στην κεντρική Ιταλία. Άλλο ένα μοντέλο αναπτύχθηκε και εφαρμόσθηκε στην Σουηδία για την πρόγνωση του βακτηριακού καψίματος, η οποία είναι η σοβαρότερη ασθένεια στην spring sown oilseed rape με την χρησιμοποίηση πεδίου ειδικών δεδομένων όπως καιρικά δεδομένα και ένα μοντέλο προσομοίωσης εδαφικής υγρασίας. Ένα μοντέλο για την αύξηση και ανάπτυξη στα καρότα, το CARROTSIM, θα αποτελέσει μελλοντικά ένα σύστημα αποφασιστικής σημασίας για την παραγωγή λαχανικών.

Μια άλλη εφαρμογή αγρομετεωρολογικών μοντέλων για την εκτίμηση της παραγωγής παρουσιάστηκε με την χρήση δορυφορικών εικόνων ( τηλεπισκόπηση ). Η συνδυασμένη χρήση SPOT και AHVRR εικόνων πάνω από επιλεγμένες περιοχές αποτέλεσαν τα μοντέλα προσομοίωσης CROPWATN και WOFOST. Ένα καιρός-έδαφος-καλλιέργεια μοντέλο προσομοίωσης χρησιμοποιήθηκε για την φυτική ανάπτυξη σε 25 περιοχές της ευρωπαϊκής Ρωσίας όπου οι παράμετροι του μοντέλου υπολογίσθηκαν από ημερήσιες AHVRR εικόνες. Παρομοίως ένα μοντέλο υδατικής ισορροπίας εφαρμόσθηκε στην Ιταλία περιλαμβάνοντας δορυφορικά, radar, αγροκλιματικά δεδομένα και GIS. Τέλος δορυφορικά στοιχεία χρησιμοποιήθηκαν σαν εισαγωγή στην παραγωγική διαδικασία μοντέλων για "regional yield assesment".

### 5.2.1 Μοντέλα σταθερού ρυθμού ανάπτυξης.

Πρώτα, είναι βολικό για τον ερευνητή να θεωρήσει την ανάπτυξη, όχι σαν συνολική διαδικασία αλλά σαν ένα ρυθμό που λαμβάνει χώρα από μέρα σε μέρα (Robertson 1968, 1973 Major et al 1975 Claracson and Russell, 1979) .

Καθώς αυτός ο ημερήσιος ρυθμός δεν μπορεί να μετρηθεί απευθείας, προσδιορίζεται ως ένας μέσος της συνολικής ανάπτυξης στη διάρκεια διαστημάτων μικρής χρονικής διάρκειας, κατά τη διάρκεια των οποίων μια σχετικά ομογενής αναπτυξιακή διαδικασία λαμβάνει χώρα. Ο ρυθμός είναι αμοιβαίος του μήκους αυτού του χρονικού διαστήματος. Οι Oats στο Harrow χρειάστηκαν 20 μέρες για να αναπτυχθούν από το φύτρωμα μέχρι το στάδιο του heading το 1955. Ο μέσος ρυθμός ανάπτυξης κατά την περίοδο έτσι θα είναι  $1/20 = 0.05$  ανά ημέρα. Αυτό συχνά ονομάζεται ημερήσια κλασματική προσαύξηση της ανάπτυξης.

Το απλούστερο μοντέλο ανάπτυξης καλλιεργειών είναι αυτό στο οποίο υποτίθεται ότι ο μέσος ρυθμός ανάπτυξης  $dM/dt$  μέχρι την ωρίμανση ή το τέλος της φαινολογικής περιόδου που μελετάται, είναι σταθερός  $C$  από το ένα φαινολογικό στάδιο στο άλλο, οπότε

$$\begin{aligned} dM/dt &= 1/N = c \\ \text{ή} \\ dM &= dt/N \end{aligned} \quad (5-2)$$

Το οποίο μετά από ολοκλήρωση για όλη τη διάρκεια μίας φαινολογικής περιόδου από το στάδιο  $S_1$  στο στάδιο  $S_2$  γίνεται

$$M = \int_{s_1}^{s_2} dM = \int_{t=0}^N dt/N = N/N = 1 \quad (5-3)$$

Όπου  $M$  είναι η ωρίμανση, τουλάχιστον για τη φαινολογική περίοδο που μελετάται. Αόριστη άθροιση από αυτό μπορεί να γράφει:

$$M = \sum_{s_1}^{s_2} 1/N = 1 \quad (5-4)$$

Όπου  $\Sigma$  δηλώνει την άθροιση. Με απλά λόγια, αυτό σημαίνει ότι με το να προστίθενται η ημερήσια κλασματική ανάπτυξη κατά τη διάρκεια μιας φαινολογικής περιόδου, το σύνολο θα δώσει μονάδα στο τέλος αυτής της περιόδου.

### 5.2.2 Μοντέλα Δείκτη Υπόλοιπου Θερμοκρασιών (TRIM)

Ο ημερήσιος ρυθμός ανάπτυξης σπάνια είναι σταθερός αλλά ποικίλει εξαιτίας ενός αριθμού από περιβαλλοντικούς παράγοντες (κυρίως θερμοκρασία και μήκος ημέρας) τα οποία, θεωρητικά τουλάχιστον, επηρεάζουν το βιοχημικό ρυθμό παραγωγής συγκεκριμένων ορμονών στο φυτό, οι οποίες με τη σειρά τους ελέγχουν το ρυθμό της ανάπτυξης. Η σχέση μπορεί να εκφραστεί σαν μια διαφορική εξίσωση:

$$dM/dt = R = F(w) \quad (5-5)$$

Όπου  $M$  είναι η ανάπτυξη μέχρι την ωρίμανση  
 $R$  είναι ο ρυθμός ανάπτυξης και  
 $F(W)$  είναι μια συνάρτηση ενός αριθμού από καιρικούς Παράγοντες.

Οι τιμές των  $M$  και  $R$  δεν είναι άμεσα παρατηρήσιμες αλλά μπορεί να εκτιμηθούν με την ολοκλήρωση της εξίσωσης (5-5), με αναφορά στο χρόνο και στη διάρκεια του διαστήματος της φαινολογικής περιόδου π.χ. από το φαινολογικό στάδιο  $S_1$  στο  $S_2$ , όπως έγινε στην εξίσωση (5-3).

$$M = \int_{s_1}^{s_2} R dt = \int_{s_1}^{s_2} F(w) dt = 1 \quad (5-6)$$

Υποτίθεται ότι η ανάπτυξη εξελίσσεται ξεκινώντας από το μηδέν και καταλήγοντας στο ένα κατά τη διάρκεια μιας μόνο φαινολογικής περιόδου. Έτσι το ολοκλήρωμα στην εξίσωση (5-6) γίνεται μονάδα για τον βαθμό ανάπτυξης στην ωριμότητα στο στάδιο S2. Η επιλογή της τιμής του  $M=1$  στο τέλος της φαινολογικής περιόδου είναι αυθαίρετη. Σε μια κάπως παρόμοια προσέγγιση οι Vagra - Haszonits (1971) πρότειναν μια τιμή 1000. Οι Brown (1960) και Basset (1971) χρησιμοποίησαν μια τιμή 10000 ενώ ο Arnold 1959 πρότεινε μια τιμή 100 η οποία εκφράζει το ρυθμό ανάπτυξης σε εκατοστιαία ποσοστά, 100% είναι η τιμή της ανάπτυξης στο τέλος της φαινολογικής περιόδου.

Καθώς μπορεί να υπάρχουν πολλές ομογενείς φαινολογικές περίοδοι κατά τη διάρκεια της συνολικής αναπτυξιακής διάρκειας της καλλιέργειας η συνολική τιμή για  $M$  στην ωρίμανση μπορεί να είναι ένα πολλαπλάσιο μιας τιμής. Για το ανοιξιότικο σιτάρι, για παράδειγμα, η συνολική ανάπτυξη περνάει από την σπορά μέσω του φυτρώματος στο αδελφωμα στο καλάμωμα το γαλάκτωμα και στην ωρίμανση ένα σύνολο από πέντε φαινολογικά στάδια στην ωρίμανση, με συνολική τιμή του  $M = 5$ . Αυτή ήταν η βάση για την ανάπτυξη της βιομετεωρολογικής χρονοσειράς (BTMS), από τον Robertson το 1968.

Η συνάρτηση  $F(w)$  μπορεί να είναι μια συνάρτηση κάθε αριθμού στοιχείων καιρού που παίρνονται σε συνδυασμό για να δώσουν ένα ρεαλιστικό μοντέλο το οποίο μπορεί να συσχετιστεί με το ρυθμό ανάπτυξης  $R$ . Στην περίπτωση που μια γραμμική συνάρτηση της θερμοκρασίας θεωρείται ότι είναι μόνο η επίδραση στην ανάπτυξη, η εξίσωση (5-5) γίνεται:

$$R = a + bT_m \quad (5-7)$$

$$= b (T_m + a/b) \quad (5-8)$$

Εδώ το  $R$  είναι ο ημερήσιος ρυθμός ανάπτυξης και το  $T_m$  είναι η ημερήσια μέση θερμοκρασία.

Υποκαθιστώντας την εξίσωση (5-8) στην (5-5) και ολοκληρώνοντας με αναφορά στον χρόνο ή σε μια πεπερασμένη βάση, δηλαδή αθροίζοντας κάθε ημέρα άθολη κατά την διάρκεια της φαινολογικής περιόδου από το στάδιο S1 στο στάδιο S2 εξάγονται τα παρακάτω:

$$\sum_{s2}^{s1} R = \sum_{s2}^{s1} b(T_m + a/b) = M = 1 \quad (5-9)$$

Διαιρώντας με  $b$  (και παραλείποντας τα όρια του αθροίσματος) γίνεται

$$\sum (T_m + a/b) = 1/b = k \quad (5-10)$$

$$\begin{matrix} \text{ή} \\ \sum (T_m - T_o) = k \end{matrix} \quad (5-11)$$

Αυτή είναι η γνωστή μονάδα θερμότητας ή εξίσωση ημεροβαθμών ανάπτυξης που χρησιμοποιείται από τους καλλιεργητές κηπευτικών για την εκτίμηση της ημερομηνίας ωρίμανσης συγκεκριμένων λαχανικών. (Holmes and Robertson, 1959, and Edey, 1971).

Ο όρος εξίσωση ή μοντέλο μονάδας θερμότητας δεν είναι ίσως ο καταλληλότερος καθώς καμία ποσότητα θερμότητας, με τη φυσική σημασία δεν εμπλέκεται σε αυτό (Went, 1957).

Πουθενά στην εξίσωση δεν πολλαπλασιάζεται η θερμοκρασία με συγκεκριμένη θερμότητα για να δώσει μια νέα ποσότητα θερμότητας. Η θερμοκρασία εμπλέκεται απ'ευθείας στο ότι επηρεάζει το ρυθμό κάποιων συγκεκριμένων βιοχημικών αντιδράσεων οι οποίες με τη σειρά τους ελέγχουν το ρυθμό ανάπτυξης.

Η ισότητα μερικές φορές αναφέρεται ως μοντέλο δείκτη υπολοίπου θερμοκρασιών (TRIM). Αυτή η ονομασία ξεπερνάει τις αντιρρήσεις για τα θέματα της θερμότητας και της μεγέθυνσης και θα χρησιμοποιείται στο εξής όταν αναφερόμαστε σε αυτό το μοντέλο. Ο δείκτης ημερήσιας θερμοκρασίας θα αναφέρεται ως TRI και το άθροισμα των ημερήσιων τιμών ως TRIS.

Η τιμή του  $T_0 = -a/b$  είναι προφανώς θερμοκρασία κατωφλίου στην οποία η ανάπτυξη ξεκινάει να λαμβάνει χώρα. Οι Arnold (1959) και Goyne (1977) τόνισαν ότι αυτή η προφανής θερμοκρασία ή θερμοκρασία βάσης δεν είναι απαραίτητο να συμβαδίζει με την πραγματική φυσιολογική θερμοκρασία κατωφλίου. Η διαφορά μεταξύ τους βασίζεται στη μέθοδο που χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό της τιμής κατωφλίου και οι υποθέσεις που γίνονται αφορούν την επίδραση των καιρικών παραγόντων στο ρυθμό ανάπτυξης.

Στο σημείο αυτό η θερμοκρασία θεωρείται ότι είναι η μοναδική επίδραση και υποτίθεται ότι υπάρχει γραμμική απόκριση, γεγονός που σημαίνει ότι το σφάλμα μεταξύ της προφανούς θερμοκρασίας κατωφλίου και του φυσιολογικού κατωφλίου είναι μεγάλο. Απόρροια του προηγούμενου είναι το γεγονός ότι ο όρος κατώφλι θα θεωρείται ότι είναι η προφανής θερμοκρασία κατωφλίου η οποία μπορεί να συμβαδίζει ή όχι με την πραγματική φυσιολογική θερμοκρασία.

Η τιμή  $1/b=k$  στην εξίσωση (5-10) είναι η τιμή της σταθεράς άθροισης (TRIS), ο αριθμός των ημεροβαθμών, ή το άθροισμα του ημερήσιου υπολοίπου θερμοκρασιών (TRI) που χρειάζεται η καλλιέργεια για να περάσει από το φαινολογικό στάδιο στο οποίο γίνεται αναφορά.

Οι συντελεστές  $a$  και  $b$ , μπορεί να εκτιμηθούν με ανάλυση συσχέτισης χρησιμοποιώντας μια τροποποίηση της εξίσωσης (5-10). Αυτό δίνει μια μοναδική λύση στο πρόβλημα του υπολογισμού τόσο της θερμοκρασίας κατωφλίου όσο και της σταθεράς άθροισης ταυτόχρονα (Arnold 1959).

Διαιρώντας με το  $N$ , πολλαπλασιάζοντας με το  $b$ , και παραλείποντας τα όρια του αθροίσματος η εξίσωση γίνεται:

$$b \sum T_m / N + \sum a / N = 1/N \quad (5-12)$$

Η οποία είναι της μορφής:

$$bT_a + a = R_a \quad (5-13)$$

όπου

$$T_a = \sum T_m / N \quad (5-14)$$

Το  $T_a$  είναι ο μέσος όρος της ημερήσιας μέσης θερμοκρασίας κατά τη διάρκεια της φαινολογικής περιόδου που μελετάται και  $R_a = 1/N$  είναι ο μέσος ημερήσιος ρυθμός ανάπτυξης κατά τη διάρκεια της περιόδου.

Για να εκτελεσθεί η ανάλυση συσχέτισης είναι απαραίτητο να υπάρχει ένας αριθμός από σετ από ημερήσια δεδομένα από τα οποία μια



σειρά από ζευγάρια τιμών των  $T_m$  και  $1/N=R_a$  μπορούν να υπολογιστούν για να χρησιμοποιηθούν στην ανάλυση συσχέτισης. Ένα παράδειγμα ενός τέτοιου σετ δεδομένων και μια ανάλυση δείχνονται στον πίνακα 5.1 και τα σχήματα 5.2 και 5.3.

Σκοπός είναι να παρθεί η απευθείας προσέγγιση και να γίνει μια ανάλυση συσχέτισης του  $N$  με το  $T_a$  για να εξαχθεί η παρακάτω σχέση:

$$N = a + BT_a \quad (5-15)$$

$$\text{ή}$$

$$N = b(T_a + a/b) \quad (5-16)$$

Η ανάλυση συσχέτισης ή η ανάλυση ελαχίστων τετράγωνων δίνει τις ακόλουθες τιμές για τους συντελεστές:

$$a = 107.65$$

$$b = -3.75$$

$$a/b = -28.7$$

Και έτσι η εξίσωση (5-16) γίνεται:

$$N = -3.75 (T_a - 28.7) \quad (5-17)$$

Αυτή η γραμμή συσχέτισης δείχνεται στο σχήμα 5.2.

Ένα διάγραμμα του αριθμού των ημερών μέχρι την ωριμότητα,  $N$ , προς την θερμοκρασία,  $T_a$ , δείχνει μια σχεδόν γραμμική αρνητική συσχέτιση (Σχήμα 5.2.)

Η τιμή του  $a/b$  δηλώνει ότι η θερμοκρασία των 28.7 °C είναι η άριστη, με αποτέλεσμα τη μέγιστη ανάπτυξη, με τη μείωση της διάρκειας από το στάχιασμα μέχρι την ωριμότητα στο μηδέν. Αυτό φυσιολογικά είναι αδύνατο.

Επίσης η εξίσωση δίνει βαρύτητα στην ελάχιστη τιμή κατωφλιού της θερμοκρασίας παρόλο που αν μια τιμή 0 αντικατασταθεί στην  $T_a$  στην εξίσωση (5-17) η υπολογιζόμενη τιμή για τη διάρκεια της περιόδου από το στάχιασμα στην ωριμότητα,  $N$ , γίνεται 108 μέρες- όχι και πολύ συνήθης τιμή για το σημείο παγιοποίησης. Έτσι είναι περίπου προφανές ότι τέτοια μοντέλα ή μαθηματικές σχέσεις θα δώσουν μη πραγματικά αποτελέσματα, και πρέπει να χρησιμοποιηθούν με μεγάλη προσοχή έξω από τα όρια των πειραματικών δεδομένων για τον υπολογισμό των συντελεστών.

Μια προσεκτική μελέτη των δεδομένων στο διάγραμμα στο σχήμα 5.2 προτείνει ότι η σχέση μεταξύ  $N$  και  $T_a$  είναι καμπυλόγραμμη, (υπερβολή) και έτσι η σχέση μπορεί να γίνει γραμμική με τη χρήση του μέσου ρυθμού ανάπτυξης  $R_a$ , όπως προτείνεται στην εξίσωση (5-13). Η σχέση δείχνεται στο σχήμα 5.3.

Η ανάλυση συσχέτισης δίνει την ακόλουθη εξίσωση:

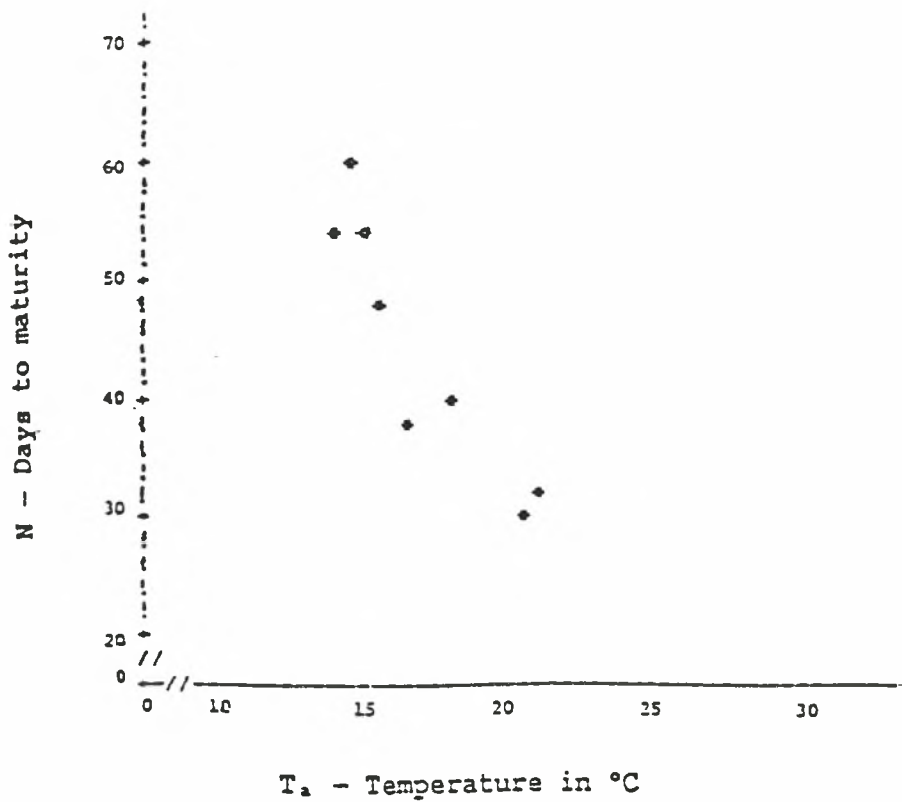
$$R_a = 1/N = .00228(T_a - 6.34) \quad (5-18)$$

Η σε όρους TRIM (εξίσωση 5-11)

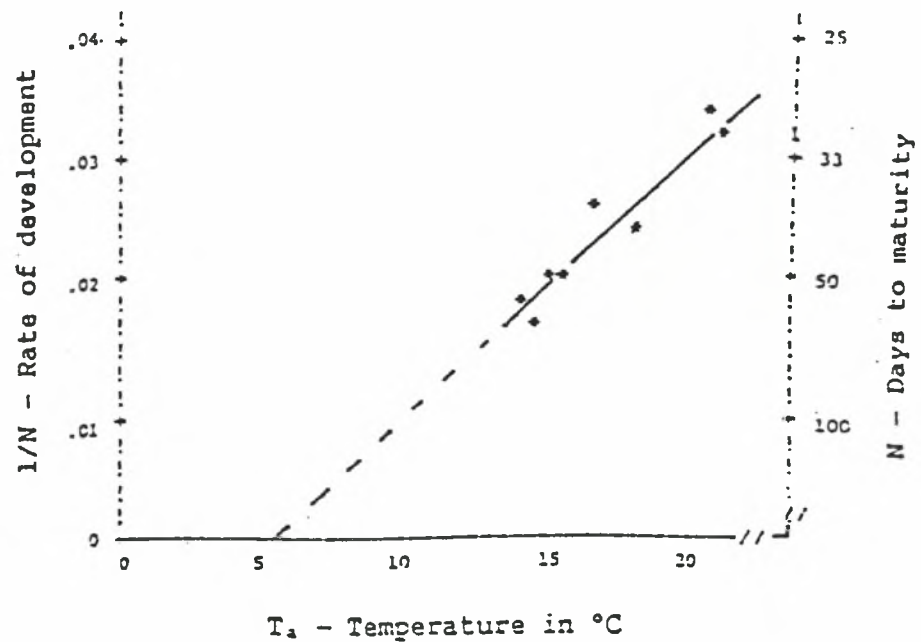
$$\Sigma (T_m - 6.34) = 439 \quad (5-19)$$

**Πίνακας 5.1** Μέση διάρκεια της περιόδου από το στάχυασμα μέχρι την ωρίμανση. Ο υπολογισμένος ρυθμός ανάπτυξης κατά η διάρκεια της περιόδου και ο μέσος της ημερήσιας μέσης θερμοκρασίας κατά τη διάρκεια της περιόδου, για στάρι της ποικιλίας Marquis που καλλιεργήθηκε σε 8 σταθμούς κατά μήκος του Καναδά. Τα αποτελέσματα βασίζονται σε παρατηρήσεις πέντε χρόνων από το 1952 ως το 1957 (Ripley, 1959)

Station	Duration	Average rate of development	Average of the daily mean temperature
	(days)	(1/day)	(°C)
	N	1/N	T <sub>a</sub>
Harrow (42°02')	31	0.0323	21.1
Ottawa (45°24')	29	0.0345	20.6
Normandin (48°51')	54	0.0185	15.0
Swift Current (50°16')	41	0.0244	18.1
Lacombe (52°28')	59	0.0169	14.7
Beaverlodge (55°28')	54	0.0185	13.9
Fort Vermilion (58°23')	48	0.0208	15.3
Fort Simpson (61°52')	38	0.0263	16.4



**Σχήμα 5.2** Διάγραμμα αριθμού ημερών από το στάχυασμα μέχρι την ωρίμανση του σταριού ως προς το μέσο όρο της μέσης ημερήσιας θερμοκρασίας, που δείχνουν μία καμπυλόγραμμη σχέση (δεδομένα από τον πίνακα 5.1)



**Σχήμα 5.3** Μέσος ρυθμός ανάπτυξης για το σιτάρι από το στάχυσμα μέχρι την ωρίμανση προς το μέσο όρο της μέσης ημερήσιας θερμοκρασίας όπου φαίνεται γραμμική συσχέτιση. Οι τιμές στα δεξιά δείχνουν την αντίστοιχη διάρκεια της περιόδου σε μέρες (δεδομένα από τον πίνακα 5.1).



Αυτή η σχέση είναι πολύ πιο ρεαλιστική. Η θερμοκρασία κατωφλίου των 6.34 είναι κοντά στις παρατηρήσεις στον αγρό και στο θερμοκήπιο. Σε αυτή τη θερμοκρασία ο ρυθμός ανάπτυξης,  $1/N$ , είναι μηδέν και ο χρόνος μέχρι την ωρίμανση μπορεί να είναι απεριόριστος.

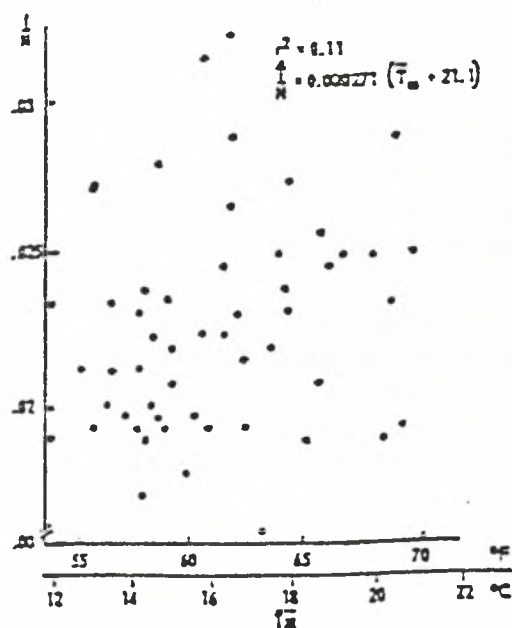
Σε υψηλότερες θερμοκρασίες ο ρυθμός της ωρίμανσης αυξάνεται μέχρι τους 40, η τιμή του  $1/N$  είναι 0.767, δηλώνοντας ότι η διάρκεια από το στάχυασμα μέχρι την ωρίμανση είναι 13 μέρες, όχι απίθανη τιμή παρόλο που τέτοιες υψηλές θερμοκρασίες μπορεί να έχουν ως αποτέλεσμα την χαμηλή ποιότητα των σπόρων.

Φαίνεται παρόλα αυτά, ότι η εξίσωση που ενσωματώνει το ρυθμό ανάπτυξης και τη θερμοκρασία (εξίσωση 5-13 ή 5-18) είναι ανώτερη από την εξίσωση για την απευθείας σχέση που περιλαμβάνει τη διάρκεια της περιόδου και τη θερμοκρασία (5-15) στο ότι δίνει πιο ρεαλιστικές εκτιμήσεις για ακραίες θερμοκρασίες και είναι φυσιολογικά πιο βάσιμη, συμπεριλαμβάνοντας ένα από τα πολύ σημαντικά προβλήματα της σχέσης θερμοκρασίας – ανάπτυξης.

Η απλή γραμμική σχέση (5-13) ή (5-18) υποθέτει ότι το TRIM δεν θα δίνει πάντα καλά αποτελέσματα, παρόλα αυτά, όπως παρουσιάζεται από το διάγραμμα της μέσης ανάπτυξης με τη μέση ημερήσια θερμοκρασία από το φύτευμα μέχρι το στάχυασμα για το σιτάρι για 53 σταθμοχρόνους σε δεδομένα παρατηρήσεων από διαφορετικές περιοχές του Καναδά (Σχήμα 5.4).

Πιθανοί λόγοι για την αποτυχία μιας σχέσης είναι:

- α) Η σχέση της θερμοκρασίας μπορεί να είναι καμπυλόγραμμη
- β) Η φωτοπερίοδος μπορεί να είναι ένας σημαντικός παράγοντας όπως επίσης και η θεώρηση μιας ελάχιστης τιμής φωτοπερίοδου.
- γ) Το μήκος της φαινολογικής περιόδου μπορεί να είναι πολύ μεγάλο, καλύπτοντας περισσότερο από μια ομογενείς φαινολογικές περιόδους. Στην πραγματικότητα η περίοδος από το φύτευμα μέχρι το στάχυασμα εκτείνεται τουλάχιστον σε δυο περιόδους. Από το φύτευμα στο αδελφωμα και από το αδελφωμα στο στάχυασμα. Κάθε περίοδος μπορεί να έχει διαφορετικές αποκρίσεις στη θερμοκρασία και τη φωτοπερίοδο.
- δ) Η ημερήσια μέση θερμοκρασία μπορεί να μην είναι καλή συνάρτηση της θερμοκρασίας για να χρησιμοποιηθεί σε ένα μοντέλο ανάπτυξης καλλιέργειας-καιρού. Μπορεί να υπάρχουν ξεχωριστές και διαφορετικές αναπτυξιακές αποκρίσεις στις ημερήσιες και νυχτερινές θερμοκρασίες.
- ε) Άλλοι παράγοντες όπως η εαρινοποίηση, η επίδραση του φωτός και η υδατική καταπόνηση, έχουν κάποια επίδραση στο ρυθμό ανάπτυξης.



**Σχήμα 5.4** Διάγραμμα διασποράς του μέσου ρυθμού ανάπτυξης ( $1/N$ ) για την περίοδο από την εμφάνιση μέχρι το στάχιασμα προς το μέσο όρο της ημερήσιας μέσης θερμοκρασίας για την ίδια περίοδο με τη χρήση δεδομένων παλινδρόμησης για τα έτη 1953 – 1957, που δείχνουν την αδυναμία του TRIM να υπολογίσει την επίδραση της θερμοκρασίας στο ρυθμό ανάπτυξης (Robertson, 1968):

### 5.2.3 Καμπυλόγραμμα μοντέλα θερμοκρασίας

Πολλές βιολογικές αποκρίσεις στη θερμοκρασία ακολουθούν τυπικά καμπυλόγραμμα πρότυπα που αποτελούνται από πέντε μέρη ( Σχήμα 5.5). Κινούμενοι από τις μικρότερες θερμοκρασίες στις μεγαλύτερες, αυτές είναι:

Α) Μια θερμοκρασία κατωφλίου στην οποία η βιολογική δραστηριότητα ξεκινάει

Β) Μια σχεδόν εκθετική αύξηση της δραστηριότητας με αυξανόμενη θερμοκρασία σε ένα μικρό εύρος θερμοκρασίας

Γ) Μια μείωση της βιολογικής δραστηριότητας με περαιτέρω αύξηση στη θερμοκρασία

Δ) Μια απότομη μείωση στη βιολογική δραστηριότητα με περαιτέρω αύξηση στη θερμοκρασία

Ε) Τελικά ένα ανώτερο όριο φαίνεται στο οποίο η θερμοκρασία είναι θανατηφόρος για τις βιολογικές διαδικασίες και στην οποία η δραστηριότητα σταματά.

Ο Lehenbauer(1914) πρώτος παρατήρησε αυτή την σχέση μελετώντας τη μεγέθυνση των ριζών στα βλαστάροντα φυτάρια καλαμποκιού. Ο Livingston 1916 χρησιμοποίησε αυτή την άποψη σε σχέση με το φυσιολογικό δείκτη για την εκτίμηση της επίδρασης της θερμοκρασίας στην ωρίμανση των καλλιεργειών

Πολλοί ερευνητές έχουν από τότε χρησιμοποιήσει μια τετραγωνική εξίσωση σαν έκφραση για τη συσχέτιση του γραμμικού ρυθμού ανάπτυξης με την μέση ημερήσια θερμοκρασία. Ο γενικός τύπος αυτής της σχέσης είναι:

$$R = F(w) = a_0 + a_1 T_m + a_2 T_m^2 \quad (5-20)$$

Και σε μορφή παρόμοια με της εξίσωσης (5-13) όπου οι μέσοι όροι των φαινολογικών περιόδων χρησιμοποιούνται:

$$R a = a_0 + a_1 T_m + a_2 T_m^2 \quad (5-21)$$

Όπου οι συντελεστές  $a_0, a_1, a_2$  μπορεί να εκτιμηθούν με ανάλυση συσχέτισης.

Η εξίσωση (5-20) μπορεί να γραφεί σε τύπο υπολοίπων θερμοκρασίας παρόμοια με τη γραμμική μορφή (εξίσωση 5-8):

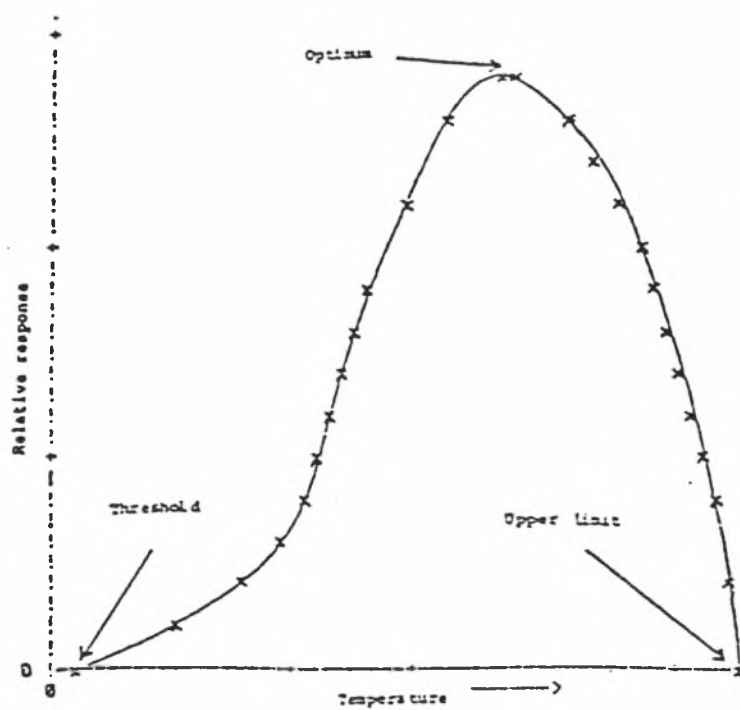
$$R = a_1 (T_m - T_o) + a_2 (T_m - T_o)^2 \quad (5-22)$$

Όπου η θερμοκρασία κατωφλίου  $T_o$ , δίνεται από τον τύπο

$$T_o = -a_1 / (2a_2) \quad (5-23)$$

Και η άριστη θερμοκρασία είναι

$$T_{op} = -a_1 / 2a_2 \quad (5-24)$$



**Σχήμα 5.5** Σχηματικό διάγραμμα που δείχνει τη γενική σχέση της επίδρασης της θερμοκρασίας στις βιολογικές δραστηριότητες και τα τρία κύρια σημεία

το κατώφλι  
το άριστο  
το ανώτερο όριο.



Τελικά η εξίσωση (5-22) μπορεί να γραφεί σε αθροιστική μορφή παρόμοια με TRIM(εξ. 5-11):

$$\Sigma [a_1 (T_m - T_o) + a_2 (T_m - T_o)^2] = k_2 \quad (5-25)$$

Μια αδυναμία της τετραγωνικής σχέσης είναι η απότομη αύξηση στο ρυθμό ανάπτυξης για θερμοκρασίες λίγο πάνω από το κατώφλι και η μικρότερη μείωση στο ρυθμό της ανάπτυξης που ακολουθεί την άριστη θερμοκρασία.

#### 5.2.4 Μοντέλα Θερμοκρασίας μήκους ημέρας

Ο Nuttonson 1948 παρουσίασε την αδυναμία του TRIM να εξηγήσει ικανοποιητικά τη διάρκεια της περιόδου από το φύτευμα μέχρι την ωρίμανση για το σιτάρι φυτεμένο σε περιοχές μεταξύ Μεξικού και Βορείου Καναδά, όπου πειραματίστηκαν με ένα μεγάλο εύρος από μήκη ημέρας. (Σχήμα 5.6 ).

Προσπάθησε να ξεπεράσει αυτό το πρόβλημα εισάγοντας τη μέση φωτοπερίοδο (μήκος ημέρας) κατά τη διάρκεια της περιόδου.

Το φωτοθερμικό του μοντέλο , μια τροποποίηση της εξίσωσης (5-11), μπορεί να γραφεί στη μορφή:

$$\Sigma (T_m - T_o) L_a = K \quad (5-26)$$

Όπου  $L_a$ , είναι το μέσο μήκος ημέρας κατά τη διάρκεια της φαινολογικής περιόδου και  $K$  είναι η σταθερά φωτοθερμικής άθροισης.

Ο Nuttonson βρήκε ότι η ποικιλομορφία από σταθμό σε σταθμό της σταθεράς άθροισης  $K$ , ήταν μικρότερη από την ποικιλομορφία στη σταθερά άθροισης  $k$  στο TRIM αλλά ακόμη υπήρχε μεγάλο περιθώριο βελτίωσης.

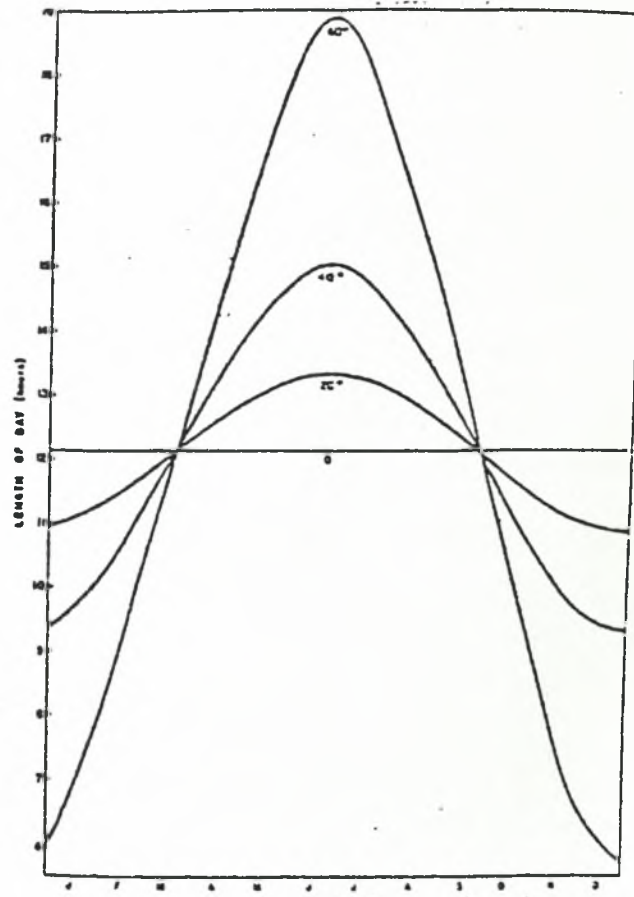
Η εξίσωση (5-26) είναι κατάλληλη για φυτά μεγάλης ημέρας κάτω από συγκεκριμένες συνθήκες. Για μικρής ημέρας φυτά η εξίσωση θα πρέπει να αλλαχθεί με τη χρήση του μήκους  $D$ , της σκοτεινής περιόδου αντί του  $L$ , του μήκους της φωτεινής περιόδου, έτσι

$$\Sigma (T_m - T_o) D_a = K_d \quad (5-27).$$

#### 5.2.5 Η ελάχιστη φωτοπερίοδος στα μοντέλα

Ο Robertson (1953) ανέφερε ένα απλό μοντέλο παρόμοιο με το TRIM αλλά χρησιμοποιώντας το μήκος της ημέρας και ένα κατώφλι μήκους ημέρας για να εξηγήσει τις διαφορές στο μήκος της περιόδου από το φύτευμα μέχρι το στάχυασμα στο σιτάρι (φυτό μακράς ημέρας) και στο κεχρί (φυτό μικρής ημέρας).

Έξι ημερομηνίες σποράς έγιναν για κάθε φυτό στη διάρκεια της καλλιεργητικής περιόδου στην Οτάβα το 1952. Παρόλο που ήταν ανεπαρκή τα αποτελέσματα ήταν θαυμάσια. Οι πρώιμες σπορές του σιταριού είχαν μικρότερο διάστημα μέχρι το στάχυασμα ενώ οι υπερπρώιμες σπορές για το κεχρί χρειάστηκαν περισσότερο για να φτάσουν στο στάχυασμα.



**Σχήμα 5.6** Μηνιαία τάση του μήκους ημέρας στον Ισημερινό και βορειότερα σε γεωγραφικά πλάτη  $20^\circ$ ,  $40^\circ$ , και  $60^\circ$ .

Καθώς η εποχή προχωρούσε, και οι μέρες γινόταν μικρότερες, μετά τις 21 Ιουνίου, το σιτάρι χρειαζόταν περισσότερο καιρό μέχρι το στάχυασμα ενώ το κεχρί στάχυαζε γρηγορότερα. Υπολογισμοί του TRIM δεν εξηγούσαν τις διαφορές αυτές αλλά η άθροιση των ωρών της διάρκειας της ημέρας πάνω από ένα κατώφλι για το σιτάρι και των ωρών σκότους πάνω από ένα κατώφλι για το κεχρί εξηγούσαν τις αλλαγές στο μήκος της περιόδου με την πρόοδο της εποχής και επίσης τις διαφορές στο ρυθμό της ανάπτυξης για το σιτάρι και το κεχρί.

Οι εξισώσεις που χρησιμοποιήθηκαν για αυτό το σκοπό ήταν  
Για το σιτάρι

$$\Sigma (L - 10.7) = 194 \quad (5-28)$$

Και για το κεχρί

$$\Sigma (D - 5.7) = 151 \quad (5-29)$$

Όπου  $\Sigma$  είναι το άθροισμα απ το φύτευμα μέχρι το στάχυασμα  
 $L$  είναι το ημερήσιο μήκος της ημέρας  
 $D$  είναι το ημερήσιο μήκος της νύχτας ή η διάρκεια της σκοτεινής περιόδου.

Αν το μήκος της ημέρας αντί για το μήκος της νύχτας είχαν χρησιμοποιηθεί για το κεχρί η εξίσωση θα γινόταν:

$$\Sigma (L - 18.3) = -147 \quad (5-30)$$

Η αρνητική τιμή αθροίσματος προκύπτει από το γεγονός ότι το κατώφλι του μήκους της ημέρας είναι μεγαλύτερο από την πραγματική διάρκεια της ημέρας στην Οτάβα. Παρότι η εξίσωση δουλεύει εξίσου καλά με την εξίσωση (5-29) η τελευταία είναι φυσιολογικά πιο ρεαλιστική και αποφεύγει τις αρνητικές τιμές.

Αυτή η άποψη για ένα κατώφλι φωτοπεριόδου χρησιμοποιήθηκε στο τρι- τετραγωνικό μοντέλο .

### 5.2.6 Τρι-τετραγωνικό μοντέλο

Στην προσπάθεια του για βελτίωση του TRIM και του φωτοθερμικού μοντέλου , ο Robertson (1968), πρότεινε ένα τρι-τετραγωνικό μοντέλο που περιλαμβάνει τετραγωνικές συναρτήσεις των θερμοκρασιών στη διάρκεια της μέρας και της νύχτας και της φωτοπεριόδου σε όσο το δυνατό μικρότερες φαινολογικές περιόδους .

Η μορφή του μοντέλου ακολούθησε αυτό των εξισώσεων (5-5) και (5-6) όπου  $F(w)$  έγινε το αποτέλεσμα τριών τετραγωνικών συναρτήσεων

$$\int_{s_1}^{s_2} F_1(T_1, T_2) * F_2(L) dt = 1 \quad (5-31)$$

Ειδικότερα, με τη χρήση πεπερασμένης άθροισης και παραλείποντας τα όρια της άθροισης

$$\Sigma[a_1 (L-ao) + a_2(L-ao)^2 + b_1(T_1-bo) + b_2 (T_1-bo)^2 + b_3 (T_2-bo) + b_4(T_2-bo)^2] = 1 \quad (5-32)$$

Όπου  $\Sigma$  είναι το άθροισμα των ημερήσιων τιμών

$L$  είναι η ημερήσια διάρκεια του μήκους της ημέρας σε ώρες από την αστρονομική ανατολή μέχρι τη δύση.

$T_1, T_2$  είναι τα ημερήσια μέγιστα και ελάχιστα των θερμοκρασιών αντίστοιχα

$a_0, b_0$  είναι οι τιμές κατωφλίου της φωτοπεριόδου και της θερμοκρασίας αντίστοιχα

$a_1, a_2, b_1, b_2, b_3, b_4$  είναι συντελεστές.

Το άθροισμα του αποτελέσματος βγαίνει ημερησίως από την έναρξη του ενός φαινολογικού σταδίου μέχρι το τέλος της περιόδου.

Η ημερήσια άθροιση παράγει στο τέλος κάθε ημέρας, ένα αθροιστικό σύνολο το οποίο είναι κλάσμα της συνολικής ανάπτυξης για τη φαινολογική περίοδο που μελετάται. Αυτό το αθροιστικό σύνολο είναι παρόμοιο με μια κλίμακα ανάπτυξης δηλώνοντας την εξέλιξη προς την ωριμότητα. Αυτή η κλίμακα που προκύπτει από το τρι-τετραγωνικό μοντέλο είναι γνωστή ως βιομετεωρολογική χρονική κλίμακα BMTS.

Για μια φαινολογική περίοδο η κλίμακα εκτείνεται από 0.0 μέχρι 1.0. Όταν λήφθηκαν υπόψη 5 φαινολογικές περίοδοι και με την πρόσθεση αυτών μεταξύ τους, το τρι-τετραγωνικό μοντέλο δίνει ένα BMTS από 0.0 μέχρι 5.0 ως την ωρίμανση. Το BMTS μπορεί να συγκριθεί με τη βιολογική χρονική κλίμακα σε ένα προς ένα βάση.

Παρά τα προφανή πλεονεκτήματα αυτής της εξίσωσης, υπάρχει ένα σημαντικό μειονέκτημα. Καθώς η εξίσωση περιλαμβάνει το προϊόν των ημερήσιων τιμών των περιβαλλοντικών παραγόντων, οι ακραίες ημερήσιες τιμές θερμοκρασίας δεν καλύπτονται με την διαδικασία των μέσων όρων όπως στην περίπτωση των μοντέλων όπου όλοι οι παράγοντες προστίθενται, για παράδειγμα σε μοντέλα πολλαπλής παλινδρόμησης.

Αυτό διευρύνει αποτελεσματικά το εύρος των περιβαλλοντικών παραγόντων που χρειάζονται για την εκτίμηση των συντελεστών στο τρι-τετραγωνικό μοντέλο.

Μια αδυναμία του μοντέλου είναι το γεγονός ότι μαθηματικά είναι απαραίτητο να περιορίσουμε την μικρότερη θερμοκρασία κατωφλίου σε μια κοινή τιμή τόσο για τη μέγιστη όσο και για την ελάχιστη θερμοκρασία.

Οι συντελεστές στην εξίσωση έχουν υπολογισθεί για πέντε διαφορετικές φαινολογικές περιόδους για δυο καλλιέργειες, το ανοιξιάτικο σιτάρι και τη βρώμη. Χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα για πέντε χρόνια 1953-1957 από 8 σταθμούς κατά μήκος του Καναδά καθώς και μετεωρολογικά δεδομένα που αποτελούνταν από ημερήσιες τιμές του μήκους της ημέρας και μέγιστων και ελάχιστων θερμοκρασιών. Οι τελευταίες υποτέθηκε ότι είναι αντιπροσωπευτικές για τις αποτελεσματικές θερμοκρασίες ημέρας και νύχτας.

Τα αποτελέσματα από τον υπολογισμό των συντελεστών για το σιτάρι μπορεί να αθροιστούν γραφικά σε ένα σεν από καμπύλες χαρακτηριστικής απόκρισης δείχνοντας την επίδραση της φωτοπεριόδου της μέγιστης θερμοκρασίας και της ελάχιστης θερμοκρασίας στη διάρκεια κάθε μιας από τις φαινολογικές περιόδους.

Σε μερικές περιπτώσεις η καμπυλόγραμμη σχέση είναι προφανής, παρόλα αυτά μόνο γραμμικές σχέσεις αναπτύχθηκαν. Αυτό έγινε γιατί το



εύρος των δεδομένων των παρατηρήσεων δεν συμπεριλάβανε αρκετά μεγάλο εύρος των τιμών ώστε να καλύψουν το καμπυλόγραμμο μέρος της απόκρισης. Το πρόγραμμα για τον υπολογισμό των συντελεστών σχεδιάστηκε για τον υπολογισμό συντελεστών για γραμμικές σχέσεις αν μια καμπυλόγραμμη δεν ήταν στατιστικά σημαντική.

Έχοντας ένα μεγαλύτερο εύρος από πειραματικά δεδομένα διαθέσιμα, οι περισσότερες από τις σχέσεις θα μπορούσαν να έχουν εμφανίσει καμπυλόγραμμο χαρακτηριστικά.

Οι υπολογισμένοι συντελεστές δίνουν δεδομένα από τα οποία μερικά από τα κύρια σημεία για διάφορες φαινολογικές περιόδους μπορεί να εκτιμηθούν για το σιτάρι και το κριθάρι.

Υπάρχουν μερικές ομοιότητες και αρκετές διαφορές στα χαρακτηριστικά απόκρισης του κριθαριού και του σιταριού όπως φαίνεται στους πίνακες των κύριων σημείων.

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι, για μαθηματικούς λόγους η χαμηλότερη θερμοκρασία κατωφλιού τόσο για τη μέγιστη όσο και για την ελάχιστη θερμοκρασία πρέπει να γίνουν ίσες. (Εξίσωση 5-32).

Η αρνητική θερμοκρασία κατωφλιού για το σιτάρι για τη φαινολογική περίοδο από το φύτευμα έως το αδελφωμα φαίνεται μικρή αλλά αυτή η ποικιλία σιταριού (Marquis) είναι πολύ ανθεκτική στις χαμηλές θερμοκρασίες αμέσως μετά το φύτευμα και αυτό το αρνητικό κατώφλι μπορεί να αντανακλά αυτά τα γενετικά χαρακτηριστικά (Robertson 1970).

Οι τιμές κατωφλιού για τη φωτοπερίοδο στη φαινολογική περίοδο από το γαλάκτωμα μέχρι την ωρίμανση, οι οποίες είναι μεγαλύτερες από 24 ώρες μπορούν να μεταφραστούν σαν θετική απόκριση στην σκοτεινή περίοδο με το κατώφλι σκοτεινής περιόδου ίσο με την φωτοπερίοδο κατωφλιού μείον 24 ώρες.

Δυο σημαντικοί παράγοντες προκύπτουν από αυτές τις τιμές στα κύρια σημεία και στις καμπύλες χαρακτηριστικής απόκρισης στο σχήμα 5.7.

A) κάθε φαινολογική περίοδος της καλλιέργειας μπορεί να έχει συγκεκριμένα περιβαλλοντικά χαρακτηριστικά απόκρισης

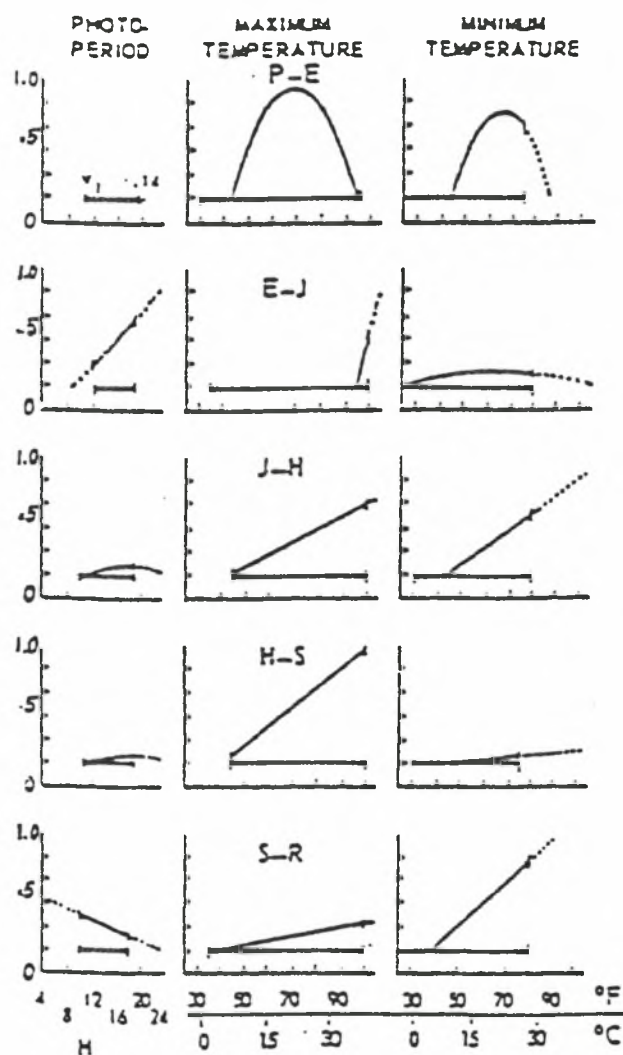
B) κάθε είδος μπορεί επίσης να έχει συγκεκριμένα χαρακτηριστικά περιβαλλοντικής απόκρισης

Από τα παραπάνω προκύπτει ότι σε κάθε μοντέλο στο οποίο οι ίδιοι συντελεστές χρησιμοποιούνται στη διάρκεια του κύκλου ζωής ενός φυτού εκτιμώντας το χρόνο της ωρίμανσης ή τη διάρκεια της ανάπτυξης μπορεί να υπόκεινται σε τυχαία σφάλματα.

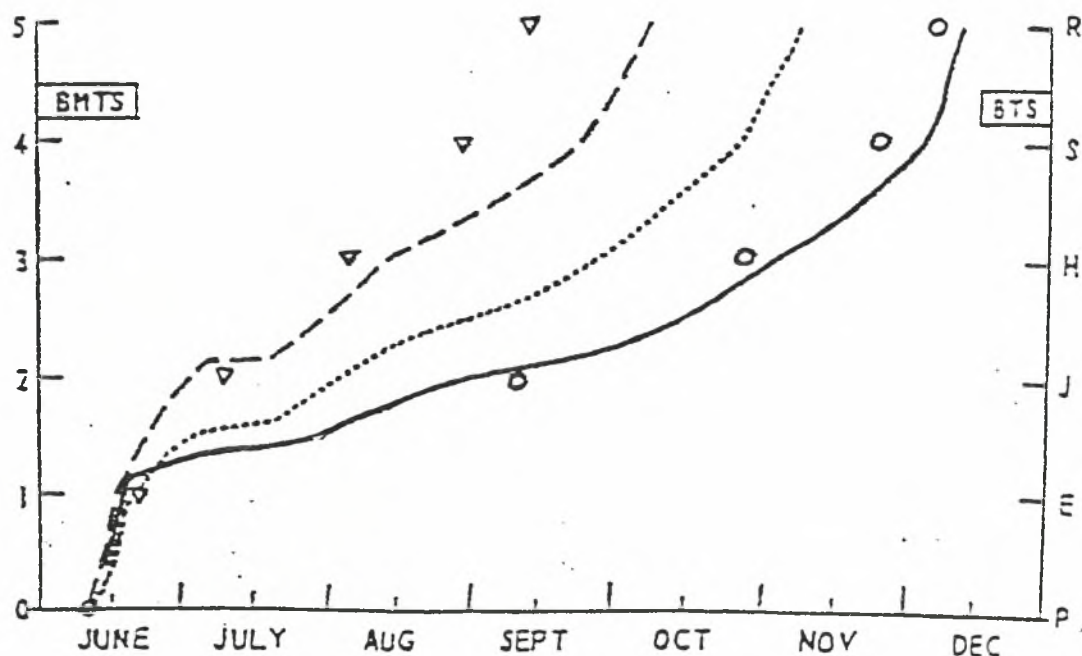
Για τη δόκιμη της αξιοπιστίας και της ανωτερότητας του τρι-τετραγωνικού μοντέλου, ο Robertson χρησιμοποίησε ένα δεύτερο σετ ανεξάρτητων δεδομένων κατά μήκος του Καναδά για τα χρόνια 1958 – 1952 και ένα εντελώς ανεξάρτητο σετ δεδομένων (ίδια ποικιλία σιταριού) που πήρε από την Αργεντινή για τα χρόνια 1961- 1961. Αυτό είχε σαν αποτέλεσμα να αναπτυχθούν τέσσερα μοντέλα:

**Μοντέλο 1.** Βασίστηκε στην αποδοχή ότι η καλύτερη εκτίμηση της ηλικίας της καλλιέργειας σε διάφορα φαινολογικά στάδια μπορεί να παρθεί από τις μέσες ηλικίες των διάφορων σταδίων ενός σετ από δεδομένα συσχέτισης (Εξίσωση 5-4).

**Μοντέλο 2.** Βασίστηκε σε TRIM (Εξίσωση 5-11)



**Σχήμα 5.7** Χαρακτηριστικές καμπύλες απόκρισης για το στάρι ποικιλίας Marquis, βασισμένες στους συντελεστές παλινδρόμησης που υπολογίστηκαν με τη χρήση ενός τρι-τετραγωνικού μοντέλου. (εξίσωση 5-32). Τα μέρη των καμπυλών με ασυνεχείς γραμμές είναι πέρα από το εύρος των παρατηρούμενων τιμών. Οι άξονες είναι σχετικές τιμές της ημερήσιας κατανομής των τριών περιβαλλοντικών παραγόντων προς τον ημερήσιο ρυθμό ανάπτυξης (από Robertson, 1968).



**Σχήμα 5.8** Η αθροιστική ανάπτυξη του σιταριού ποικιλίας Marquis στην Αργεντινή, 1965.

Το BMTS είναι η υπολογιζόμενη βιομετεωρολογική χρονική κλίμακα (Εξ. 2. 37). Το BTS είναι η πραγματική βιομετεωρολογική χρονική κλίμακα από το P (σπορά) στο E (φύτρωμα), J (αδέλφωμα), H (στάχυσμα), S (γαλάκτωμα) και R (ωρίμανση).

Οι μικροί κύκλοι είναι τα στάδια των παρατηρήσεων. Τα τρίγωνα είναι ο μέσος όρος των ημερών των σταδίων από τις παρατηρήσεις των πέντε χρόνων. Οι καμπύλες είναι οι ακόλουθες:

- ..... ανάπτυξη υπολογισμένη με TRIM,
- ανάπτυξη υπολογισμένη με φωτοθερμικό μοντέλο,
- ανάπτυξη υπολογισμένη με τρι-τετραγωνικό μοντέλο

**Μοντέλο 3.** Βασίστηκε σε μία απλή φωτοθερμική εξίσωση που προτάθηκε από τον Nuttonson (Εξίσωση 5-26).

**Μοντέλο 4.** Βασίστηκε σε ένα τρι-τετραγωνικό μοντέλο. (Εξίσωση 5-32).

Τρεις δόκιμες χρησιμοποιήθηκαν για να συγκριθούν τα τέσσερα μοντέλα. Πρώτα, όταν η υπολογισμένη ηλικία πλοττάρεται ως προς την πραγματική ηλικία για ένα σετ δεδομένων, ο διαχωρισμός της γραμμής συσχέτισης θα πρέπει να είναι κοντά στο μηδέν., δηλώνοντας έτσι ότι υπάρχει ελάχιστη αμφιβολία για την υπολογιζόμενη ηλικία.

Δεύτερον, η κλίση της καμπύλης συσχέτισης σε ένα τέτοιο διάγραμμα θα πρέπει να είναι κοντά στη μονάδα, δηλώνοντας έτσι ότι κάθε αμφιβολία που υπάρχει είναι μοναδική σε όλο το εύρος της πραγματικής ηλικίας στο σετ δεδομένων.

Και τρίτον, η ρίζα του μέσου τετράγωνου του σφάλματος μεταξύ της υπολογισμένης και της πραγματικής ηλικίας στο σετ πρέπει να είναι ελάχιστη.

Οι συγκρίσεις των τεσσάρων μοντέλων δείχνουν ότι το BMTS λειτουργεί καλύτερα στις περισσότερες δόκιμες εκτός αυτής για τα δεδομένα της Αργεντινής.

Στην Αργεντινή πολλές σπορές του ανοιξιάτικου σιταριού ποικιλίας Marquis έγιναν στην δική τους φθινοπωρινή περίοδο. Γι'αυτό το λόγο το σιτάρι έπρεπε να παραμείνει στη διάρκεια του χειμώνα σε συνθήκες όπου η θερμοκρασία και η φωτοπερίοδος ήταν και οι δυο κάτω από τα αντίστοιχα κατώφλια ανάπτυξης.

Η επίδραση αυτής της διαχείμασης στην ανάπτυξη και της ικανότητας του τρι-τετραγωνικού μοντέλου να εκτιμήσει την επίδραση φαίνεται στο σχήμα 5.8.

Αυτή η ικανότητα του μοντέλου να δουλεύει καλά σε ακραίες συνθήκες είναι χαρακτηριστικό ενός μοντέλου που παίρνει υπόψη του πολλούς από τους μετεωρολογικούς παράγοντες που επηρεάζουν την ανάπτυξη.

## 5.2.7 Μοντέλα Εαρινοποίησης

Μερικές καλλιέργειες χρειάζονται μια κρύα μεταχείριση, ένα αριθμό ψυχρών ωρών που ονομάζεται εαρινοποίηση, κατά τη διάρκεια της περιόδου της πρώιμης βλαστικής ανάπτυξης αμέσως μετά το φύτεμα ώστε να μειωθεί ο χρόνος μέχρι την άνθιση. Πολύ λίγες προσπάθειες έγιναν για να εκφράσουν τη διαδικασία της εαρινοποίησης με μαθηματικά μοντέλα.

Δουλεύοντας με τη μηδική οι Clarkson και Russell (1979), συμπεριέλαβαν και μια ποικιλία που χρειάζεται εαρινοποίηση. Υπέθεσαν ότι ο ρυθμός ανάπτυξης μέχρι την άνθιση ήταν μια συνάρτηση της ελάχιστης θερμοκρασίας.

Η ανάπτυξη του μοντέλου είναι παρόμοια με τις εξισώσεις (5-3),(5-5),(5-6). Καθώς ο ρυθμός της εαρινοποίησης μειώνεται όσο αυξάνεται η θερμοκρασία, διάλεξαν μια συνάρτηση ελάχιστης ημερήσιας θερμοκρασίας όπως

$$F(T_2) = a_1 \exp (-a_2 T_2) \quad (5-33)$$



Ολοκληρώνοντας ή αθροίζοντας την συνάρτηση αυτή με τις μέρες στη διάρκεια της περιόδου ανάπτυξης παρουσιάσθηκε μια ένδειξη της ωρίμανση ή της ολοκλήρωσης της περιόδου, με την σχέση

$$M = \sum a_1 \exp (-a_2 T_2) = 1 \quad (5-34)$$

Βρέθηκε με ανάλυση ελάχιστων τετραγώνων ότι οι τιμές του  $a_1 = 0.265$   $a_2 = 0.334$  έδιναν τα καλύτερα αποτελέσματα.

Παρόλο που αυτό το μοντέλο βελτίωσε τον υπολογισμό της διάρκειας της περιόδου ανάπτυξης, ένα πρόβλημα μπορεί να ήταν ότι χρησιμοποιήθηκαν ημερήσιες ελάχιστες θερμοκρασίες που ελήφθησαν κατά τη διάρκεια της περιόδου ανάπτυξης προς μελέτη.

Όταν η επίδραση της περιόδου ανάπτυξης είναι συνήθως ένα αποτέλεσμα ψυχρής μεταχείρισης κατά τη διάρκεια της εγκατάστασης και αμέσως μετά τη βλάστηση αλλά πριν τη διαφοροποίηση των ανθοφόρων οφθαλμών.

Γίνεται έτσι εύκολα αντιληπτό ότι οι θερμοκρασίες που χρησιμοποιήθηκαν στο μοντέλο εαρινοποίησης θα πρέπει να είναι αυτές για την περίοδο πριν από την διαφοροποίηση των ανθοφόρων οφθαλμών.

### 5.2.8 Μοντέλα δείκτη διαφοράς θερμοκρασιών (TRIM)

Τα TRIM είναι τα περισσότερο ευρέως εφαρμόσιμα από τα μοντέλα που χρησιμοποιούν μετεωρολογικά δεδομένα για την καταγραφή των ημερών των φαινολογικών συμβάντων, ειδικά την ημέρα της ωρίμανσης. Η ισότητα για το μοντέλο γράφεται ισοδύναμα

$$\sum_{s1}^{s2} (T - T_0) = K \quad (5-35)$$

Όπου  $(T - T_0) = 0$ , δεδομένου ότι  $T < T_0$

$\sum$  είναι το άθροισμα σε μία δοσμένη φαινολογική περίοδο από το στάδιο S1 στο στάδιο S2

$T$  είναι η θερμοκρασία, συνήθως η μέση ημερήσια θερμοκρασία αλλά μπορεί να είναι επίσης η μέγιστη ημερήσια, η ελάχιστη ημερήσια ή ο μέσος για καθε δοσμένη περίοδο

$T_0$  είναι η θερμοκρασία βάσης

$K$  είναι η σταθερά του αθροίσματος ή ο δείκτης θερμοκρασιακού υπόλοιπου TRIM

Στη διαδικασία της άθροισης όλες οι θερμοκρασίες ίσες με και κάτω απο τη θερμοκρασία βάσης αγνοούνται, π.χ στην περίπτωση  $(T - T_0) = 0$ . Για τον υπολογισμό της κατάστασης της ωριμότητας απλά υπολογίζεται η τιμή  $(T - T_0)$  για καθε μερα απο μια ημέρα έναρξης ( συνήθως την ημέρα σποράς) και προσθέτοντας αυτές τις ημερήσιες τιμές μέχρι το άθροισμα να είναι ίσο ή να ξεπερνάει το TRIS ( $K$ ) για το είδος και την ποικιλία της καλλιέργειας που αναφερόμαστε.

Εκτεταμένοι πίνακες για την σταθερά άθροισης δεν είναι σε μεγάλη εφαρμογή καθώς αυτές οι τιμές ποικίλουν από εφαρμογή σε εφαρμογή και εξαρτώνται από ένα αριθμό παραγόντων όπως :

**Α) Επίπεδο γονιμότητας εδάφους.** Χαμηλή γονιμότητα εδάφους προκαλεί αργή μεγέθυνση. Ένα υψηλό επίπεδο αζώτου δίνει μεγάλη μεγέθυνση βλαστών και έτσι καθυστερεί την ωρίμανση. Υψηλό επίπεδο φωσφόρου τείνει να παρατείνει την ωρίμανση.

**Β) Πληθυσμός φυτών.** Χαμηλός πληθυσμός φυτών ωριμάζει σχετικά νωρίτερα από πυκνότερο πληθυσμό, με την προϋπόθεση ότι τα ζιζάνια δεν αυξάνουν την διαφορά.

**Γ) Τύπος εδάφους.** Αμμώδη εδάφη ζεσταίνονται νωρίτερα απ' ότι τα αργιλώδη εδάφη. Άλλοι παράγοντες όπως η κατάσταση της γονιμότητας και χαρακτηριστικά υγρασίας σχετίζονται με τον τύπο εδάφους.

**Δ) Θερμοκρασία εδάφους.** Κατά την ανοιξιότικη αύξηση της θερμοκρασίας, η θερμοκρασία του εδάφους υστερεί σε σχέση με τη θερμοκρασία της ατμόσφαιρας. Έτσι αν οι ημεροβαθμοί προστίθενται με βάση την θερμοκρασία αέρα, το αποτέλεσμα που θα προκύψει μπορεί να είναι πολύ υψηλό. Η καταγραφή της θερμοκρασίας του εδάφους μπορούν να αντικατασταθεί μέχρι την εμφάνιση των φυτών. Νότιες πλάγιες ζεσταίνονται πιο γρήγορα την άνοιξη από βόρειες πλάγιες. Σπόροι που φυτεύονται βαθιά είναι πιο δροσεροί και συχνά εμφανίζονται αργότερα από ότι φυτά που φυτεύονται ρηχά, με την προϋπόθεση ότι η υγρασία δε λείπει.

**Ε) Εδαφική υγρασία.** Εδάφη με φτωχή στράγγιση είναι κρύα και επίσης προκαλούν την ανάπτυξη πολλών θρεπτικών προβλημάτων. Αν η υγρασία λείπει την περίοδο του φυτρώματος η νωρίς κατά την μεγέθυνση, η ωρίμανση καθυστερεί παρά το ότι ο αριθμός των ημεροβαθμών έχει ολοκληρωθεί. Ξηρασία στο τελευταίο στάδιο της διάρκειας της ζωής των φυτών συχνά επιβραδύνει την ωρίμανση ή τα φυτά μπορεί να πεθάνουν πριν φτάσουν στην ωριμότητα.

**ΣΤ) Φωτοπερίοδος.** Τοπικές διαφοροποιήσεις στο ρυθμό ωρίμανσης ενός συγκεκριμένου φυτού σχετίζονται συνήθως με την ποικιλία στο μέγεθος της φωτοπερίοδου (μήκος ημέρας). Μεγαλύτερες περίοδοι φωτός μειώνουν τις ανάγκες σε θερμότητα (αθροιστική θερμοκρασία), ειδικά αυτών που αναπτύσσονται σε κρύο καιρό. Παρ' όλα αυτά το άθροισμα των ημεροβαθμών φαίνεται να παρέχει σχετικά ακριβείς ενδείξεις χωρίς προσαρμογές στη φωτοπερίοδο σε μια περιοχή, γιατί οι ώρες φωτός ημέρας δεν ποικίλουν πολύ κατά τη διάρκεια της ζωής των περισσότερων φυτών στη ζώνη θερμοκρασίας.

Σε άλλες ζώνες στο βορά η διάρκεια της φωτόφασης ίσως θα έπρεπε να ληφθεί υπόψη. Μερικά φυτά ωριμάζουν γρήγορα στο βορά, όπου οι μέρες είναι μεγάλες το καλοκαίρι, παρά τα αναμενόμενα από την άθροιση της θερμοκρασίας.

Ένας προβληματισμός του TRIM είναι το γεγονός ότι χρησιμοποιεί τη μέση ημερήσια θερμοκρασία η οποία υπολογίζεται ως το ένα δεύτερο του αθροίσματος της ημερήσιας θερμοκρασίας (συνήθως εμφανίζεται το πρωί αμέσως μετά την ανατολή ) και της ημερήσιας μέγιστης (συχνά εμφανίζεται λίγες ώρες μετά το ηλιακό απόγευμα. Ένας τέτοιος υπολογισμός δεν δίνει πληροφορίες για τη διάρκεια της θερμοκρασίας πάνω από τη θερμοκρασία βάσης.

Μια καθαρή ημέρα, για παράδειγμα, μπορεί να έχει ένα ελάχιστο από 3 °C και ένα μέγιστο από 13 °C ενώ σε μια εντελώς νεφοσκεπή ημέρα, τιμές 6

$^{\circ}\text{C}$  και  $10^{\circ}\text{C}$  αντίστοιχα. Και τις δύο ημέρες παρατηρείται η ίδια μέση θερμοκρασία,  $8^{\circ}\text{C}$ . Αν η θερμοκρασία βάσης για ένα συγκεκριμένο φυτό είναι  $2^{\circ}\text{C}$  δεν υπάρχει πρόβλημα. Αν όμως η βάση μεταξύ ελάχιστου και μέγιστου την καθαρή μέρα είναι έστω  $5^{\circ}\text{C}$  τότε μέρος της θερμοκρασίας για αυτή την ημέρα είναι χωρίς επίδραση, καθώς είναι κάτω από την τιμή κατωφλίου.

Οι Lindsey και Newman (1956) πρότειναν μια μέθοδο για να ξεπεραστεί αυτό το πρόβλημα με τον υπολογισμό του ημερήσιου αριθμού των ωροβαθμών πάνω από ένα κατώφλι με τη χρήση τόσο της μέγιστης όσο και της ελάχιστης θερμοκρασίας. Υπολόγισαν ότι η ημερήσια αύξηση στην θερμοκρασία από το ελάχιστο στο μέγιστο ξαναπέφτει στο ελάχιστο σχηματίζοντας ένα τρίγωνο με βάση ίση με 24 ώρες και ύψος ίσο με το εύρος μεταξύ της μέγιστης και της ελάχιστης θερμοκρασίας.

Ο αριθμός των ωροβαθμών συσχετίζεται με το εμβαδόν αυτού του τριγώνου αλλά πρέπει να γίνουν προσαρμογές για την τιμή της θερμοκρασίας κατωφλίου. Σημείωσαν λοιπόν τρεις περιπτώσεις

**A)** Η ελάχιστη θερμοκρασία είναι ίση με τη θερμοκρασία κατωφλίου. Εδώ η θερμοκρασία για όλες τις ώρες κατά τη διάρκεια της ημέρας είναι πάνω από την τιμή κατωφλίου και ο αριθμός των ωροβαθμών είναι:

$$DH = 24 \times (T_m - T_o) \quad (5-36)$$

Αυτό είναι το ίδιο σαν να πολλαπλασιάζεται η μέση ημερήσια θερμοκρασία με την θερμοκρασία κατωφλίου για τις 24 ώρες.

**B)** Η ελάχιστη θερμοκρασία είναι μεγαλύτερη από τη θερμοκρασία κατωφλίου. Εδώ η συνολική επιφάνεια που υπολογίζεται αποτελείται από ένα ορθογώνιο με βάση τις 24 ώρες και ύψος  $T_2 - T_1$  βαθμούς συν ένα τρίγωνο με βάση 24 ώρες και ύψος  $T_1 - T_2$  βαθμούς. Η συνολική επιφάνεια δίνεται ως:

$$DH = 24x (T_m - T_o) \quad (5-37)$$

Η απάντηση είναι ίδια με τη προηγούμενη περίπτωση.

**Γ)** Η ελάχιστη θερμοκρασία είναι κάτω από τη θερμοκρασία κατωφλίου. Εδώ ένα μέρος από τη θερμοκρασία κατά τη διάρκεια της περιόδου των 24 ωρών είναι κάτω από το κατώφλι και έτσι είναι αναποτελεσματική για την μεγέθυνση του φυτού. Σ' αυτή την περίπτωση αποτελεσματικές θερμοκρασίες κατά τη διάρκεια της μέρας είναι αυτές πάνω από τη βάση του τριγώνου στο  $T_o$  και οι συνολικοί ωροβαθμοί παριστάνονται από το εμβαδόν του στέρεου τριγώνου, η βάση του οποίου δίνεται από τον τύπο:

$$B = 24x(T_1 - T_o) / (T_1 - T_2) \quad (5-38)$$

Και έτσι

$$DH = 12 \times (T_1 - T_o)^2 / (T_1 - T_2) \quad (5-39)$$

Προφανώς ο αριθμός των ωροβαθμών στην τελευταία περίπτωση είναι μεγαλύτερος από ότι θα μπορούσε να ληφθεί αν η μέση ημερήσια θερμοκρασία είχε χρησιμοποιηθεί. Αυτός ο τύπος είναι σημαντικός στην πρώτη περίοδο μεγέθυνσης των φυτών όταν οι θερμοκρασίες είναι χαμηλές και πολλές μέρες έχουν ελάχιστα κάτω από την τιμή κατωφλίου.

**Πίνακας 5.2** Τιμές κατά προσέγγιση της θερμοκρασίας κατωφλίου και της σταθεράς άθροισης από τη σπορά μέχρι την ωρίμανση μερικών καλλιεργειών.

Crop	Threshold temperature $T_0$ (°C)	Summation constant TRIS (k) (Celsius degree days)
Canning peas:		
- early	5	650
- late	5	930
Sweet corn:		
- early	10	775
- late	10	1 000
Snap beans:		
- early	10	620
- late	10	860
Cantaloupe	10	1 110
Pumpkins	13	*
Tomatoes	13	*



Χρησιμοποιώντας αυτές τις μεθόδους καθώς και άλλες προτάσεις των Lindsey και Nessman 1956 και Arnold (1960), οι Williams και Joseph (1970) ετοίμασαν απλούς πίνακες που προσδιορίζουν τον αριθμό των ημεροβαθμών πάνω ή κάτω από κάθε θερμοκρασία κατωφλιού σε διάφορες κλίμακες. Σε αυτούς τους πίνακες οι παραπάνω προσδιορισμοί για τους ωροβαθμούς διαιρέθηκαν με 24 ώρες για να προσδιοριστεί ο αριθμός των ημεροβαθμών ανά ημέρα.

### 5.2.9 Ο συντελεστής της μεθόδου ποικιλότητας

Ο προσδιορισμός της θερμοκρασίας κατωφλιού και της σταθεράς άθροισης για το TRIM για ένα δεδομένο είδος καλλιέργειας και ποικιλίας συζητείται από τον Arnold (1959). Γι' αυτό το λόγο είναι απαραίτητο να υπάρχουν φαινολογικές παρατηρήσεις τουλάχιστον από τις μέρες σποράς και ωρίμανσης της ζητούμενης καλλιέργειας μαζί με ημερήσιες παρατηρήσεις των μέγιστων και ελάχιστων θερμοκρασιών. Τέτοιες παρατηρήσεις χρειάζονται για την ίδια ποικιλία καλλιέργειας σε μια περίοδο πολλών χρόνων και κατά προτίμηση από διαφορετικές τοποθεσίες ώστε να υπάρχει όσο δυνατό μεγαλύτερο εύρος στους παράγοντες του καιρού.

Ο στόχος βέβαια είναι να υπολογιστεί η τιμή της θερμοκρασίας κατωφλιού για να χρησιμοποιηθεί στην TRIM, η οποία θα δώσει μια εκτίμηση του αριθμού των ημερών μέχρι την ωρίμανση με τη μικρότερη δυνατή τυπική απόκλιση για ένα σετ δεδομένων. Μπορεί ναδειχθεί αλγεβρικά ότι η ίδια θερμοκρασία κατωφλιού θα δώσει σταθερές άθροισης με ένα ελάχιστο συντελεστή ποικιλότητας του σετ δεδομένων με την προϋπόθεση ότι οι ημερήσιες θερμοκρασίες δεν θα είναι κάτω από τις θερμοκρασίες κατωφλιού. Ο συντελεστής ποικιλότητας προσδιορίζεται ως ο λιγότερης τυπικής απόκλισης από το σετ των δεδομένων προς τη μέση τιμή και πολλαπλασιαζόμενος επί 100 για να εκφράσει το αποτέλεσμα ως ποσοστό.

Αυτή η τεχνική χρειάζεται ένα αριθμό από υπολογισμούς χρησιμοποιώντας υποτιθέμενες τιμές της θερμοκρασίας κατωφλιού. Η διαδικασία του μηδενισμού στη σωστή τιμή για να δώσει ένα ελάχιστο συντελεστή ποικιλότητας μπορεί να είναι αργή και επίπονη. Ένα παράδειγμα υπολογισμού δίνεται στον πίνακα 5.2., όπου η θερμοκρασία κατωφλιού προσδιορίστηκε προηγουμένως με τη μέθοδο παλινδρόμησης.

Οι δύο μέθοδοι προσδιορίζουν την ίδια θερμοκρασία κατωφλιού παρότι υπάρχει μια μικρή αλλά όχι σημαντική διάφορα στον συντελεστή άθροισης με αποτέλεσμα ένα λάθος λιγότερο της μιας ημέρας δεδομένου ότι συνήθως πολλοί ημεροβαθμοί αθροίζονται για κάθε ημέρα. Για τον προσδιορισμό της θερμοκρασίας κατωφλιού σε καλύτερο από 1/10 C<sup>0</sup> μέσο όρο χρειάζεται τύπο εκτεταμένης σημαντικότητας τόσο στον συντελεστή άθροισης όσο και στην τυπική απόκλιση.

### 5.2.10 Η μέθοδος παλινδρόμησης

Οι Basset et al (1961) ανέπτυξαν μια rational τεχνική για τον υπολογισμό τόσο της θερμοκρασίας κατωφλιού

**Πίνακας 5.3** Ένα παράδειγμα της χρήσης του ελάχιστου συντελεστή παραλλακτικότητας του Arnold για τον προσδιορισμό της θερμοκρασίας κατωφλίου στο TRIM.

Assumed threshold (°C)	Summation constant (degree-days)	Standard deviation	Coefficient of variation (%)
10.00	280	45.5	16.3
7.00	413	37.3	9.03
6.40	439.19	39.04	8.8889
6.34	441.84	39.27	8.8878
6.30	443.61	39.43	8.8864
6.00	457	40.8	8.93
0.0	722	92.7	12.8

Το όσο και του TRI η σταθερά άθροισης  $k$  σε σχέση με τη μελέτη της άνθισης των πολυετών δένδρων και θάμνων σε μέρες με θερμοκρασίες κάτω από τις θερμοκρασίες κατωφλιού οι οποίες δεν φαίνεται να επηρεάζουν την ανάπτυξη.

Χρησιμοποίησαν μια παρόμοια με την εξίσωση 5-13 μαζί με μια σειρά από παρατηρήσεις φαινολογικών και ημερήσιων θερμοκρασιών πολλών ετών, για λόγους παλινδρόμησης. Οι ημερήσιες θερμοκρασίες χρησιμοποιήθηκαν για τον υπολογισμό της μέσης θερμοκρασίας κατά τη διάρκεια της φαινολογικής περιόδου από την 1<sup>η</sup> Μαρτίου μέχρι την ημερομηνία άνθισης. Μαζί με τους ρυθμούς ανάπτυξης,  $1/N$ , έφτιαχναν μια σειρά από ζευγάρια δεδομένων για διαδικασίες παλινδρόμησης.

Μετά τον υπολογισμό της πρώτης παλινδρόμησης όλες οι θερμοκρασίες κάτω από την θερμοκρασία κατωφλιού απομακρύνθηκαν. Μια νέα μέση θερμοκρασία για κάθε φαινολογική περίοδο υπολογίστηκε, μετρώντας μόνο μέρες με θερμοκρασίες πάνω από την θερμοκρασία κατωφλιού, και η παλινδρόμηση επαναλήφθηκε.

Καθώς οι μέρες με θερμοκρασίες ίσες με ή μικρότερες από το κατώφλι απορρίφθηκαν, διαφορετικές τιμές τόσο για το μέσο ρυθμό ανάπτυξης  $1/N$ , όσο και τη μέση θερμοκρασία χρησιμοποιήθηκαν σε κάθε ζευγάρι δεδομένων. Αυτό έδωσε ένα δεύτερο υπολογισμό της θερμοκρασίας κατωφλιού.

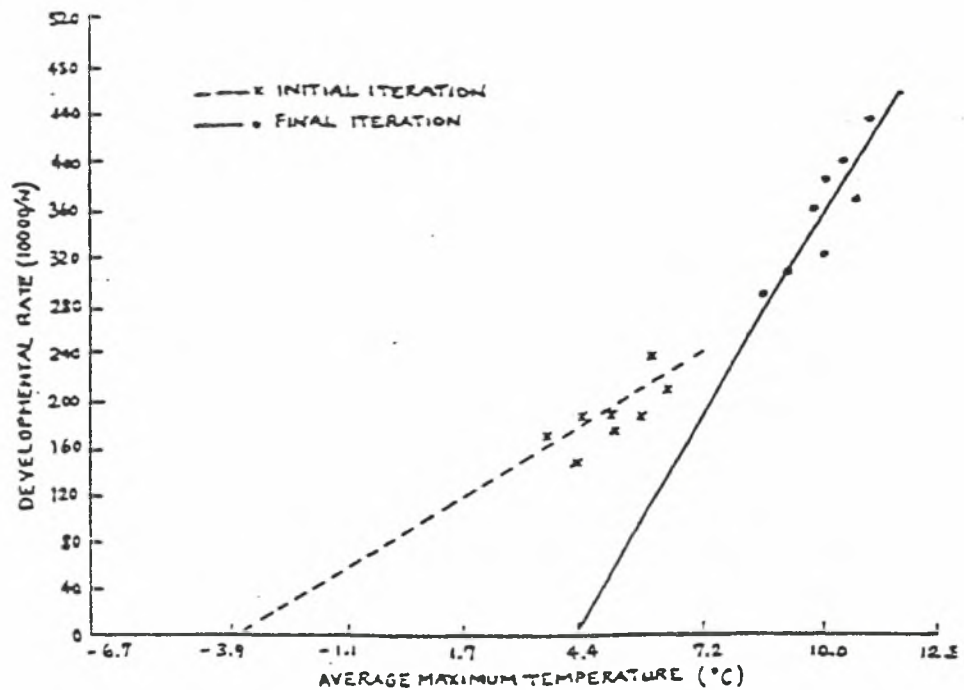
Η διαδικασία επαναλήφθηκε μέχρι το σημείο όπου καμία αλλαγή στην θερμοκρασία κατωφλιού δεν εμφανίζονταν. Περίπου τέσσερις τέτοιοι υπολογισμοί ήταν αρκετοί για να δώσουν μια σταθερή θερμοκρασία κατωφλιού και μια τιμή για το TRIS που να είναι λογικής αποδοχής.

Όπου δεν υπήρχαν ημερήσιες τιμές κάτω από τη θερμοκρασία κατωφλιού η τεχνική της παλινδρόμησης δούλεψε καλά και επαναλαμβανόμενοι υπολογισμοί δεν χρειάζονταν. Το πλεονέκτημα της τεχνικής παλινδρόμησης με τη χρήση της εξίσωσης 5-13, είναι ότι ταιριάζει για το σετ δεδομένων που χρησιμοποιείται. Η θερμοκρασία κατωφλιού και σταθερά άθροισης μπορούν να υπολογιστούν χωρίς εμπόδια και λάθη επικάλυψης. Επιπλέον συγκεκριμένα στατιστικά υπολογίζονται επίσης κατά τη διάρκεια της ανάλυσης παλινδρόμησης η οποία επιτρέπει την ανάπτυξη της στατιστικής σημασίας της συσχέτισης των συντελεστών και της παλινδρόμησης.

Στην εργασία των Basset (1961) βρέθηκε ότι μερικά είδη ανταποκρίνονται καλύτερα σε μέγιστες θερμοκρασίες, άλλα σε ελάχιστες θερμοκρασίες και επίσης αλλά εμφανίζονται να μην έχουν αντίδραση στην θερμοκρασία. Η θερμοκρασιακή απόκριση επικαλύφθηκε από αποκρίσεις άλλων παραγόντων.

Μια μόνο τροποποίηση της εξίσωσης 5-13, χρησιμοποιήθηκε από τον Cotter 1979 για την ανάπτυξη της  $T_o$ , όπως και του συνόλου της θερμοκρασίας  $k$ , για το σιτάρι:

$$T_A = T_o + k(1/N) \quad (5-40)$$



**Σχήμα 5.10** Γραμμές παλινδρόμησης και δυωνυμικές κατανομές δείχνουν τη σχέση μεταξύ μέγιστης θερμοκρασίας,  $T_1$ , και ρυθμού ανάπτυξης στο φυτό *Populus grandidentata* πριν και μετά την αφαίρεση των ημερών με θερμοκρασίες κάτω από την θερμοκρασία κατωφλίου.



Εδώ το πρόβλημα είναι ότι η μέση θερμοκρασία είναι η εξαρτημένη μεταβλητή αντί για το  $Rae$  ή το  $1/N$  όπως στην περίπτωση της εξίσωσης 5-13. Αν ο συντελεστής συσχέτισης δεν είναι πολύ υψηλός τα αποτελέσματα από την εξίσωση 5-40 θα είναι διαφορετικά από τα αποτελέσματα της εξίσωσης 5-13 όπου  $Rae$  ή  $1/N$ , είναι οι εξαρτημένες μεταβλητές και  $T_a$  η ανεξάρτητη μεταβλητή όπως συνήθως όταν επιχειρείται να υπολογισθεί ο ρυθμός ανάπτυξης από τη θερμοκρασία.

Στη Φιλανδία μια προσπάθεια έγινε για τη χρήση υπολογισμένων ημεροβαθμών πάνω από τη θερμοκρασία κατωφλίου των  $5^{\circ}\text{C}$  για τη ζωνοποίηση της καλλιέργειας του κριθαριού. Ανακαλύφθηκε κατά τη διάρκεια δοκίμων σε πειραματικούς σταθμούς ότι διαφορετικές περιοχές χρειάζονταν διαφορετικά ποσά αθροίσματος ημεροβαθμών από τη σπορά μέχρι την ωρίμανση για την ίδια ποικιλία κριθαριού. Αυτά τα μεγέθη, που ονομάστηκαν αθροίσματα αποτελεσματικής θερμοκρασίας, φάνηκαν να συσχετίζονται θετικά με τις μέσες θερμοκρασίες κατά την διάρκεια της ζητούμενης περιόδου.

Δόκιμες έγιναν με τη χρήση άλλων θερμοκρασιών κατωφλίου και φάνηκε ότι έδιναν καλύτερα αποτελέσματα για πρώιμες σπορές όταν η μέση θερμοκρασία κατά τη διάρκεια της βλαστικής περιόδου ήταν χαμηλή. Η θερμοκρασία κατωφλίου των  $5^{\circ}\text{C}$  έδινε καλύτερα αποτελέσματα για όψιμες σπορές (εξαιτίας του υγρού καιρού), με αποτέλεσμα υψηλότερες μέσες θερμοκρασίες κατά τη διάρκεια της βλαστικής περιόδου.

Σε αυτήν την περίπτωση υποτέθηκε ότι μερικές υψηλές θερμοκρασίες κατά τη διάρκεια της ημέρας δεν χρησιμοποιούνταν αποτελεσματικά από την καλλιέργεια για την ανάπτυξη με τη χρήση των υψηλότερων θερμοκρασιών κατωφλίου. Ο αριθμός των αποτελεσματικών ημεροβαθμών μειώθηκε για να συμφωνεί με αυτούς που υπολογίστηκαν πάνω από τη θερμοκρασία κατωφλίου των  $2^{\circ}\text{C}$  για τα φυτά που φυτεύθηκαν νωρίτερα.

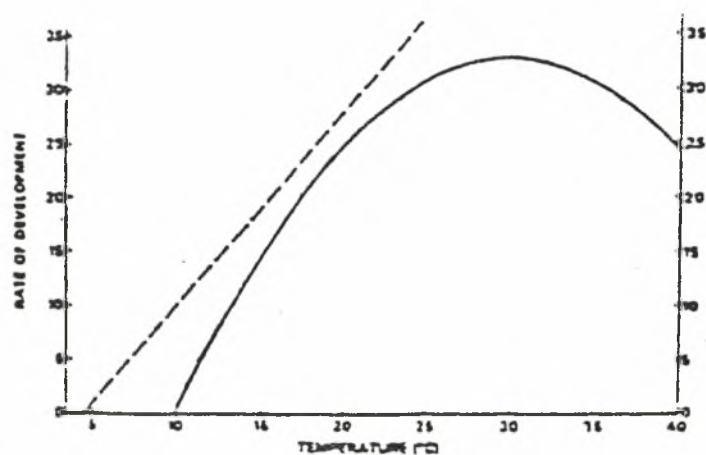
Διαφορές στη φωτοπερίοδο αναγνωρίστηκαν επίσης ως ένας πιθανός παράγοντας στην πρόκληση διαφορών στην ανάγκη ημεροβαθμών πρώιμων και όψιμων καλλιεργειών.

### 5.2.11 Καμπυλόγραμμα μοντέλα

Η επιτυχία ή η αποτυχία των TRIM να δώσουν μία καλή εκτίμηση των ημερομηνιών ωρίμανσης ή άλλου φαινολογικού γεγονότος, εξαρτάται από το αν το φυτό θα έχει μια γραμμική απόκριση στη θερμοκρασία. Αυτό όμως δεν συμβαίνει και θα πρέπει να χρησιμοποιηθεί μια καμπυλόγραμμη σχέση

Μερικές από τις αδυναμίες του TRIM για την πρόβλεψη της ωρίμανσης του καλαμποκιού ξεπεράστηκαν από τον Brown (1963,1978), ο οποίος εισήγαγε ξεχωριστές πράξεις για τη μέγιστη και την ελάχιστη θερμοκρασία στο μοντέλο του, το οποίο έγινε γνωστό ως το μοντέλο των μονάδων θερμοκρασιών του (CHU).

Η πράξη για την ελάχιστη θερμοκρασία είναι γραμμική με μια θερμοκρασία κατωφλίου  $4,4^{\circ}\text{C}$  και η πράξη για τη μέγιστη θερμοκρασία είναι δευτεροβάθμια με μια θερμοκρασία κατωφλίου  $10^{\circ}\text{C}$  και ιδανική θερμοκρασία  $30^{\circ}\text{C}$  (Σχήμα 5.11).



**Σχήμα 5.11** Σχέση μεταξύ ημερήσιου ρυθμού ανάπτυξης του καλαμποκιού και ελάχιστες και μέγιστες θερμοκρασίες.  
 ————— ημερήσιες (μέγιστες) θερμοκρασίες και  
 - - - - - νυχτερινές (ελάχιστες θερμοκρασίες)

Συνδυάζοντας αυτές τις δύο πράξεις ο Brown δίνει τον ημερήσιο ρυθμό ανάπτυξης

$$CHU = 1.8 (T_2 - 4.4) + 3.33 (T_1 - 10) - 0.84 (T_1 - 10)^2 \quad (5-41)$$

Τα υβρίδια του καλαμποκιού στο Ontario χρειάζονται ένα αθροιστικό σύνολο από 2600 μέχρι 3500 CHU ανά εποχή για την ωρίμανση, και η τιμή αυτή εξαρτάται από το υβρίδιο, το περιεχόμενο της υγρασίας και την εποχή συγκομιδής.

Το CHU μοντέλο δοκιμάστηκε ανεξάρτητα σε άλλες κλιματικές περιοχές. Οι Baron et al (1975) δοκίμασαν το μοντέλο στο Δυτικό Καναδά κάτω από πολύ διαφορετικές κλιματικές συνθήκες από ότι στο Οντάριο όπου αναπτύχθηκε. Ειδικά τεμάχια καλαμποκιού καλλιεργήθηκαν σε 5 περιοχές για ένα ως τρία χρόνια, δίνοντας ένα σετ από 14 σταθμοχρόνους φαινολογικών δεδομένων μαζί με την συνοδευόμενη πληροφορία καιρού. Τα CHU και TRIM (θερμοκρασία κατωφλιού 10 C<sup>0</sup>) έδωσαν εξίσου καλά αποτελέσματα για την πρόβλεψη της ωρίμανσης.

Στην Αγγλία ο Bunting (1976), έκανε μια παρόμοια δόκιμη του μοντέλου, με τη χρήση ενός σετ δεδομένων 40 σταθμοχρόνων από πληροφορίες που συλλέχθηκαν σε Oxford και Cambridge. Τα αποτελέσματα του έδειξαν ότι το μοντέλο CHU είναι κάπως ανώτερο από ότι το TRIM (θερμοκρασία κατωφλιού 10 C<sup>0</sup>).

Οι Asperse και Shaw (1972) δοκίμασαν το CHU μοντέλο μαζί με πολλά αλλά μοντέλα θερμοκρασίας τύπου TRI χρησιμοποιώντας 43 υβρίδια οδοντωτού καλαμποκιού. Το CHU μοντέλο έδωσε τη μικρότερη παραλλακτικότητα στο υπολογισμένο μήκος των ημερών των διάφορων φαινολογικών περιόδων που μελετήθηκαν.

Οι Claxton and Russell (1979) αναγνώρισαν αυτό το γεγονός όταν δούλευαν με την ετήσια μηδική στην Αυστραλία. Υπέθεσαν ότι στην εξίσωση 5-5 το F(W) είναι μια πράξη θερμοκρασίας μόνο π.χ.:

$$R = F(T_m) \quad (5-42)$$

Και η εξίσωση 5-6 γίνεται

$$D = \int_{s_1}^{s_2} F(T_m) DT = 1 \quad (5-43)$$

Όπου F(T<sub>m</sub>) είναι μια τετραγωνική εξίσωση. Στη τελική της μορφή η εξίσωση 5-43 γίνεται:

$$\sum_{s_1}^{s_2} [a_1(T_m - a_0) + a_2(T_m - a_0)^2] = 1 \quad (5-44)$$

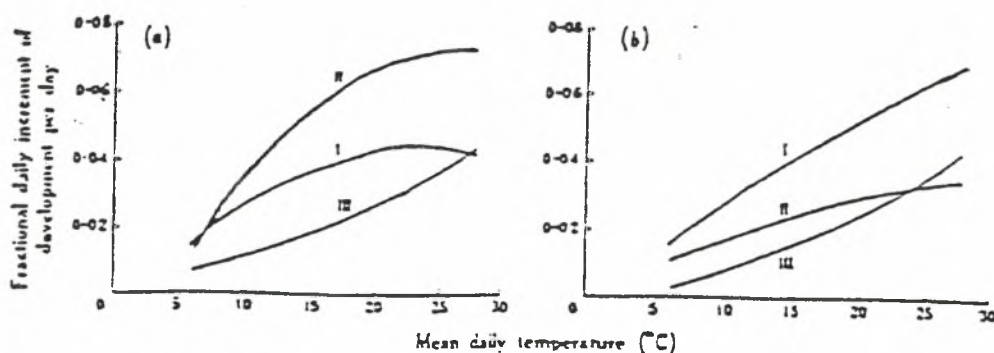
Αυτή η εξίσωση είναι παρόμοια με την εξίσωση 5-25 ή την 5-32 με τον παράγοντα φωτοπερίοδο να γίνεται μονάδα και χρησιμοποιώντας μόνο ημερήσιες μέσες θερμοκρασίες αντί για τις ημερήσιες μέγιστες ή ελάχιστες. Οι συντελεστές στην εξίσωση 5-44 υπολογίστηκαν χρησιμοποιώντας μια σειρά από μελέτες παρατηρήσεων και ένα ειδικό iterative μη γραμμική ανάλυση ελαχίστων τετράγωνων (Ross, 1971).

Η τιμή της συνάρτησης:

$$a_1(T_m - A_0) + a_2(T_m - A_0)^2 \quad (5-45)$$

για μια δοσμένη μέση ημερήσια θερμοκρασία και περίοδο ανάπτυξης είναι η ημερήσια κλασματική αύξηση της ανάπτυξης. Το άθροισμα αυτών των αυξήσεων θα πρέπει να είναι ίσο με τη μονάδα στο τέλος της ζητούμενης φαινολογικής περιόδου και είναι ταυτόσημη με τη έκφραση στη εξίσωση 5-25.

Η εξίσωση έδωσε καλά αποτελέσματα για πρωιμότερες φαινολογικές περιόδους της μηδικής. Για την περίοδο από την πρώτη άνθιση μέχρι τον πρώτο ώριμο καρπό όμως έδωσε μια πολύ χαμηλή θερμοκρασία κατωφλιού και μια σχεδόν γραμμική καμπύλη η οποία είναι ελαφρώς κυρτή προς τα επάνω από την θερμοκρασία κατωφλιού. Και οι δύο είναι φυσιολογικά μη πραγματικές και μια καλύτερη θερμοκρασία κατωφλιού ίσως να μπορούσε να προταθεί αν μια γραμμική σχέση είχε χρησιμοποιηθεί αυτήν την περίοδο.



**Σχήμα 5.12** Επίδραση της ημερήσιας θερμοκρασίας στις κλασματικές ημερήσιες αυξήσεις στην ανάπτυξη της μηδικής.

### 5.2.12 Φωτοθερμικά μοντέλα

Νωρίτερα από το 1875 ο Tisserand αναγνώρισε τη σημασία του μήκους της ημέρας στον υπολογισμό της επίδρασης της θερμοκρασίας στην ανάπτυξη των καλλιεργειών. Πολλαπλασίασε τη μέση θερμοκρασία με το μήκος του χρόνου μεταξύ ανατολής και δύσης και υπέθεσε ότι αυτό αντιπροσωπεύει το μέγεθος της εργασίας των φυτών κατά τη διάρκεια της ημέρας. Το άθροισμα αυτών των εξαγόμενων από το φύτρωμα μέχρι την ωρίμανση έδινε μια καλύτερη ένδειξη της ημερομηνίας ωρίμανσης από ότι το άθροισμα της μέσης ημερήσιας θερμοκρασίας από μόνη της.

Σχεδόν μίσος αιώνας πέρασε πριν οι Garner και Allured (1920) ερευνήσουν και περιγράψουν το φαινόμενο του φωτοπεριοδισμού στα φυτά: το αποτέλεσμα του σχετικού μήκους της ημέρας και της νύχτας στο ρυθμό της ανάπτυξης των ανθοφόρων και βλαστοφόρων οφθαλμών.

Αναγνώρισαν ότι μερικά φυτά (φυτά μικρής ημέρας) χρειάζονταν μικρές μέρες ή μακριές νύχτες για πρώιμη άνθιση, ενώ άλλα φυτά (φυτά μεγάλης μέρας) χρειάζονταν μεγάλες ημέρες ή μικρές νύχτες για πρώιμη άνθιση. Επίσης αναγνώρισαν το γεγονός ότι υπήρχε ένα συγκεκριμένο κατώφλι μήκους ημέρας ή μήκους νύχτας στο οποίο αυτή η φωτοπεριοδική επίδραση γινόταν ενεργός και ότι αυτό το κατώφλι ποίκιλε από είδος σε είδος. Η ανάγκη για ένα φωτοπεριοδικό κατώφλι στα μοντέλα ανάπτυξης παρουσιάστηκε από τον Robertson (1953) και από τότε έχει χρησιμοποιηθεί για την ανάπτυξη πιο πολύπλοκων μοντέλων

**5.2.12.1 Απλά μοντέλα.** Ο Nuttonson (1948), έδειξε ότι για συγκεκριμένα φυτά μεγάλης ημέρας όπως μερικές ποικιλίες σιταριού, ο αριθμός των μονάδων TRIS από τη σπορά μέχρι την ωρίμανση πολλαπλασιαζόμενος με το μέσο μήκος ημέρας ήταν πιο σταθερός από σταθμό σε σταθμό από ότι το TRIS μόνο του. Δεν είχε σκοπό δηλαδή να χρησιμοποιήσει καμπυλόγραμμη απόκριση του φυτού.

Η σόγια είναι φυτό μικρής ημέρας. Μια ανασκόπηση της απόκρισης της σόγιας στη θερμοκρασία και τη φωτοπερίοδο δίνεται από τον Moat (1978).

Ο Brown (1960) μελέτησε τα αποτελέσματα φαινολογικών παρατηρήσεων στη σόγια που πάρθηκαν από ελεγχόμενα περιβάλλοντα σε διάφορες θερμοκρασίες και μήκη ημέρας. Σημείωσε ότι ο ίδιος συνολικός αριθμός σκοτεινών ωρών χρειάζονταν για τα φυτά, για να αναπτυχθούν από τη σπορά μέχρι την άνθιση, σε μια δεδομένη θερμοκρασία ανεξάρτητα από τη φωτοπερίοδο. Ο αριθμός του αθροίσματος των ωρών σκοταδιού ποίκιλε παρόλα αυτά με τη θερμοκρασία και αυτή η ποικιλότητα δεν ήταν γραμμική. Κατασκεύασε λοιπόν ένα μοντέλο παρόμοιο με το παρακάτω:

$$10.000/\Sigma di = a_1(T_a - T_o) + a_2(T_a - T_o)^2 \quad (5-46)$$

όπου  $\Sigma di$  το άθροισμα του ημερήσιου μήκους νύχτας από τη σπορά μέχρι την άνθιση

$T_a$  ο μέσος όρος της θερμοκρασίας την ίδια περίοδο

$T_o$  η θερμοκρασία κατωφλίου

$a_1, a_2$  σταθερές

Εδώ υποτίθεται ότι η επίδραση του μήκους της νύχτας είναι γνωστή και έτσι θεωρείται μαζί με το μήκος της φαινολογικής περιόδου ως η εξαρτημένη μεταβλητή. Η ισότητα μπορεί να τροποποιηθεί σε μια παρόμοια με του φωτοθερμικού τύπου (5-27).

$$\Sigma Di = N D_a \quad (5-47)$$

Όπου  $N$  είναι ο αριθμός των ημερών από την σπορά μέχρι την άνθιση

$D_a$  είναι το μέσο μήκος νύχτας

Μπορεί να δειχθεί ότι η εξίσωση 4-46 είναι ισοδύναμη με:

$$\Sigma [(T_m - T_o) + (T_m - T_o)^2] D_a = K_d \quad (5-48)$$



Όπου  $T_m$  είναι η μέση ημερήσια θερμοκρασία.

$K_d$  είναι η σταθερά άθροισης όταν χρησιμοποιείται το μήκος της νύχτας.

Ας σημειωθεί ότι η τιμή του μήκους της νύχτας είναι έξω από τον όρο της άθροισης και έτσι χρησιμοποιείται ο μέσος του μήκους της νύχτας για τη φαινολογική περίοδο.

Σε αυτήν την ανάλυση, ο Brown (1960), βρήκε ότι η θερμοκρασία κατωφλιού για δυο ποικιλίες σόγιας ήταν  $10^{\circ}\text{C}$ , ότι υπήρχε μόνο μια μικρή αλλά στατιστικά μη σημαντική διάφορα μεταξύ των καμπυλών για τις δυο ποικιλίες πάνω από θερμοκρασία περίπου  $21^{\circ}\text{C}$ . Έτσι υπέθεσε μια απλή σχέση για το ρυθμό ανάπτυξης της θερμοκρασίας (σε όρους κλασματικής ανάπτυξης) σαν μια τετραγωνική πράξη της μέσης θερμοκρασίας κατά την περίοδο από τη σπορά μέχρι την άνθιση για τις δυο ποικιλίες. Οι αριθμητικές τιμές που πάρθηκαν από αυτήν την εξίσωση ονομάστηκαν Μονάδες Ανάπτυξης Σόγιας (SDU) (Brown and Chapman, 1961). Η εξίσωση είναι

$$\text{SDU} = 10.000/\Sigma d_i = 3.258(T_a - 10) - 0.08195 (T_a - 10)^2 \quad (5-49)$$

Ο Pascale (1969) βρήκε ότι ο SDU των Brown and Chapman, μπορούσε να συσχετιστεί με το άθροισμα των μέσων ημερήσιων θερμοκρασιών πάνω από τη θερμοκρασία κατωφλίου  $15^{\circ}\text{C}$  για πολλές περιοχές καλλιέργειας σόγιας στο βόρειο ημισφαίριο.

Η ανάπτυξη του ηλιάνθου μελετήθηκε από τους Goyne et al (1977), χρησιμοποιώντας δεδομένα πεδίου για δυο ποικιλίες που σπάρθηκαν στην αρχή κάθε μήνα για δυο χρόνια, 1974 και 1975, στο Biloela Research Station in Central Queensland, της Αυστραλίας. Ανεξάρτητος έλεγχος των δεδομένων ήταν διαθέσιμος από τον ίδιο ερευνητικό σταθμό για πολλές σπορές κατά την περίοδο 1973 μέχρι 1976. Καθορίστηκε ότι, για περίοδο εμφάνισης 50% άνθισης, το κατώφλι και το TRIS για την ποικιλία, Sunfolia 68-2, ήταν  $-1.3^{\circ}\text{C}$  και 1351 ημεροβαθμούς αντίστοιχα.

Για την άλλη ποικιλία, Hysun-30, η θερμοκρασία κατωφλιού βρέθηκε να είναι  $-5.9^{\circ}\text{C}$  αλλά η TRIS είχε μεγάλη ποικιλότητα και βρέθηκε να είναι μια πράξη του μήκους της ημέρας. Μια βελτίωση της σημαντικότητας στην πρόβλεψη του μήκους της φαινολογικής περιόδου έγινε εκφράζοντας την TRIS ως μια γραμμική πράξη του μέσου μήκους της ημέρας,  $L_a$ , κατά τη διάρκεια μιας περιόδου 30 ημερών αμέσως μετά την επόμενη ημέρα σποράς.

$$\begin{aligned} \text{TRIS} &= \Sigma (T_m + 5.9) = (2835.0 - 133.1L_a) + 668.2 \\ &= 35.03.2 - 133.1L_a \end{aligned} \quad (5-50)$$

Η παραπάνω εξίσωση δείχνει ότι μια αύξηση στο μήκος της ημέρας μειώνει το TRIS κρατώντας τα χαρακτηριστικά της ποικιλίας μεγάλης ημέρας. Υποτέθηκε ότι η ποικιλία Sunfolia 68-2 είχε μικρή αντίδραση σε μικρές μέρες ή ήταν φωτοουδέτερη.

Ο προσθετικός τύπος των όρων της θερμοκρασίας και του μήκους της ημέρας στην εξίσωση 5-50 είναι ασυνήθιστος όταν έχουμε να κάνουμε με μοντέλα φωτοθερμικά για την ανάπτυξη των καλλιεργειών και κάποιος αναρωτιέται αν ένας πολύπλοκος τύπος όπως η εξίσωση 5-16 ή 5-18 μπορεί να μην ανταποκρίνεται σε μια πιο ρεαλιστική τιμή κατωφλιού κοντά ή πάνω από το μηδέν

**5.2.12.2 Σύνθετα μοντέλα.** Ένα σύνθετο μοντέλο μπορεί να περιγράψει ως ένα μοντέλο στο οποίο ο ρυθμός ανάπτυξης σχετίζεται με δύο ή περισσότερους περιβαλλοντικούς παράγοντες σε ένα μη γραμμικό σύστημα, που έχει αναπτυχθεί χρησιμοποιώντας ημιμηχανιστική προσέγγιση δημιουργίας μοντέλων. Σε ένα τέτοιο σύστημα οι περιβαλλοντικοί παράγοντες συνήθως πολλαπλασιάζονται μεταξύ τους για τη μέτρηση αλληλεπιδράσεων και οι χαρακτηριστικοί συντελεστές στο μοντέλο υπολογίζονται ξεχωριστά τουλάχιστον για τις μέγιστες φαινολογικές περιόδους της καλλιέργειας που αναφερόμαστε.

Εξαιτίας της φύσης τους, τα σύνθετα μοντέλα είναι συνήθως χρήσιμα σε μεγαλύτερο εύρος περιβαλλοντολογικών παραγόντων και έτσι, σε αντίθεση με τα απλά μοντέλα είναι χρήσιμα σε ένα μεγαλύτερο εύρος κλιμάτων και γεωγραφικών τοποθεσιών όπως και για ένα αριθμό ειδών και ποικιλιών. Βέβαια οι χαρακτηριστικοί συντελεστές στα μοντέλα πρέπει να εκτιμηθούν για κάθε είδος και ποικιλία φυτού για το οποίο χρησιμοποιείται.

Οι Major et al (1975b) χρησιμοποίησαν ένα μοντέλο βασισμένο στο τρι-τετραγωνικό μοντέλο. Παρόλα αυτά αντί να χρησιμοποιήσουν μέγιστες και ελάχιστες θερμοκρασίες ξεχωριστά, τις συνδύασαν σε μέση ημερήσια θερμοκρασία. Η τελική ισότητα, η οποία ήταν:

$$1=M_{s1}\Sigma^{s2} [a_1(L-a_0) + a_2 (L-a_0)^2] \times b_1(T-b_0) + b_2 (T-b_0)^2] \quad (5-51)$$

Οι συντελεστές στην ισότητα υπολογίστηκαν με μέθοδο ανάλυση συσχέτισης και το μοντέλο ονομάστηκε για αυτό το λόγο IRA

Τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν για τον υπολογισμό των συντελεστών στο μοντέλο, πάρθηκαν από πειράματα ημέρας σποράς στον αγρό, σε διάφορες περιοχές στο Missouri και την Iowa στις κεντρικές ΗΠΑ. Σε μερικά πειράματα το μήκος της ημέρας επεκτάθηκε με τη χρήση τεχνητού φωτισμού. Μέρος των δεδομένων χρησιμοποιήθηκε για τον υπολογισμό των συντελεστών στην εξίσωση 5-51, ενώ ένα άλλο μέρος κρατήθηκε για ένα ανεξάρτητο έλεγχο της εφαρμογής του μοντέλου. Συντελεστές υπολογίστηκαν για τις εξής πέντε φαινολογικές περιόδους:

- 1 Από την σπορά μέχρι το φύτευμα
- 2 Από το φύτευμα μέχρι την έναρξη της ανθοφορίας
- 3 Από την έναρξη της ανθοφορίας μέχρι το γέμισμα του καρπού
- 4 Από την έναρξη της άνθισης μέχρι τη λήξη της άνθισης
- 5 Από την έναρξη της άνθισης μέχρι την ωρίμανση

Χρησιμοποιήθηκαν 10 καλλιέργειες, αντιπροσωπεύοντας τόσο πρώιμες όσο και όψιμες ποικιλίες.

Τα αποτελέσματα της κατασκευής των συντελεστών ήταν χρήσιμα σχεδόν σε όλες τις περιπτώσεις (φαινολογικές περίοδοι και καλλιέργειες) η τιμή της ελάχιστης φωτοπερίοδου  $a_0$ , ήταν μεγαλύτερη και από το μεγαλύτερο μήκος ημέρας στις περιοχές που καλλιεργούνταν τα φυτά. Αυτό είχε σαν αποτέλεσμα μια αρνητική τιμή του συντελεστή  $a_1$ , ο οποίος ήταν γενικά αρνητικός.

Αυτός ο συνδυασμός τιμών είναι χαρακτηριστικός για φυτά μικρής ημέρας ( που χρειάζονται μεγάλη περίοδο σκότους ). Αυτές οι αρνητικές τιμές θα μπορούσαν να είχαν αποφευχθεί με τη χρήση του μήκους της σκοτεινής περιόδου,  $D=24-L$ , στην οποία περίπτωση η τιμή του συντελεστή κατωφλιού  $a_0$ , θα ήταν η ελάχιστη σκοτεινή περίοδος.



Λίγες καλλιέργειες εμφάνιζαν χαρακτηριστικά μακράς ημέρας κατά την περίοδο του φυτρώματος μέχρι την πρώτη άνθιση με ελάχιστη φωτοπερίοδο που κυμαίνονταν από 8 μέχρι 9.6 ώρες. Θερμοκρασίες κατωφλίου ποίκιλαν από περίπου από 1 °C μέχρι 9 °C κατά την περίοδο από το φύτευμα μέχρι την πρώτη άνθιση και από 7 °C μέχρι 17 °C για την περίοδο από την πρώτη άνθιση μέχρι την ωρίμανση του καρπού.

Το μοντέλο IRA προέβλεπε την ανάπτυξη με μεγαλύτερη ακρίβεια από ότι οι ημερολογιακές ημέρες ή το TRIM σε όλες τις περιοχές που μελετήθηκαν. Καθώς το μοντέλο IRA έχει ένα διαφορετικό αριθμό από χαρακτηριστικούς συντελεστές για κάθε φαινολογική περίοδο και για κάθε καλλιέργεια, ήταν πιθανόν να χρησιμοποιηθεί αυτό το μοντέλο για να χαρακτηρίσει διαφορετικές καλλιέργειες ως προς την ευαισθησία τους στο μήκος της ημέρας και θερμοκρασία κατά τη διάρκεια διαφορετικών περιόδων.

Σε μια προσπάθεια να βελτιώσουν τα υπάρχοντα μοντέλα για τον υπολογισμό της ημέρας έναρξης της δημιουργίας του σπάδικα στο καλαμπόκι, οι Coligado and Brown (1975) ανέπτυξαν ένα μοντέλο βασισμένο σε μια σκέψη η οποία διέφερε από τα συνηθισμένα TRIM και φωτοθερμικά μοντέλα. Αυτό το μοντέλο βασίζονταν σε συγκεκριμένα βιολογικά χαρακτηριστικά, θερμοκρασία, εύρος θερμοκρασίας και φωτοπερίοδο και έτσι ονομάστηκε Βιοφωτοθερμικό μοντέλο. Ο τελικός τύπος αυτής της ισότητας είναι:

$$(TII)_i = \{1 / [G + (Dt)_{Ti, Pi, Ri}]\} * [1 - (t_{ej} - 5) b_{DP}] \quad (5-52)$$

όπου (TII)<sub>i</sub> είναι ο δείκτης ημερήσιας έναρξης δημιουργίας του σπάδικα

G είναι ο ελάχιστος χρόνος από το φύτευμα μέχρι την έναρξη δημιουργίας του σπάδικα, κάτω από βέλτιστες συνθήκες για την ανάπτυξη: T= 25 °C; P=10hq R= 0 °C;

Dt δηλώνει ένα προσθετό χρόνο, που πρέπει να προστεθεί στο G, και αντιπροσωπεύει μια μικρή διόρθωση εξαιτίας της διαφοράς των T, P, R από τις άριστες συνθήκες.

Ti Η μέση ημερήσια θερμοκρασία

Pi η ημερήσια φωτοπερίοδος ή το μήκος ημέρας

Ri είναι το ημερήσιο εύρος μεταξύ μέγιστης και ελάχιστης θερμοκρασίας.

t<sub>ej</sub> είναι ο αριθμός των ημερών από τη σπορά μέχρι το φύτευμα όπου ο ελάχιστος αριθμός ημερών είναι 5.

b<sub>DP</sub> είναι ο δυνητικός ρυθμός ανάπτυξης και προσδιορίστηκε περίπου ίσος με 0.01.

$$(Dt)_{Ti, Pi, Ri} = k_T (T_i^{-m_T} - 25^{-m_T}) + k_P T_i^{-m_P} (P_i - 10) + k_R T_i^{-m_R} (R_i - 0) \quad (5-53)$$

Η εξίσωση 5-53 αφορά τον όρο στον οποίο οι συντελεστές k<sub>R</sub>, k<sub>P</sub>, k<sub>T</sub>, m<sub>T</sub>, m<sub>P</sub>, m<sub>R</sub> προσδιορίστηκαν για δύο υβρίδια καλαμπόκιου χρησιμοποιώντας δεδομένα από πειράματα ελεγχόμενου κλίματος.

Η διάρκεια του χρόνου από το φύτευμα μέχρι την έναρξη της δημιουργίας του σπάδικα προσδιορίστηκε αθροίζοντας την ημερήσια τιμή του TTI μέχρι να γίνει ίσο με τη μονάδα. Θα έπρεπε να σημειωθεί ότι η ημερήσια μέση θερμοκρασία εμφανίζεται στο μοντέλο σε τρία σημεία. Αυτό μπορεί να υπερεκτιμά τη σημασία της. Η ημερήσια μέση θερμοκρασία μεγαλύτερη από



25° C ορίστηκε στους 25. Οι συντελεστές ποικίλουν από υβρίδιο σε υβρίδιο αλλά δεν εμφανίζονται να δίνουν χαρακτηριστικά με φυσιολογική σημασία για τα συγκεκριμένα υβρίδια.

### 5.3 Διάφορα μοντέλα (Miscellaneous models )

Πολλοί ερευνητές βρήκαν απαραίτητο να αναπτύξουν μοντέλα

α) για να χρησιμοποιήσουν περιορισμένα διαθέσιμα δεδομένα

β) για να διαπιστώσουν τις τοπικές κλιματικές ανάγκες και

γ) να ικανοποιήσουν τα ειδικά χαρακτηριστικά μιας συγκεκριμένης καλλιέργειας.

Αυτές οι ανάγκες είχαν σαν αποτέλεσμα τη δημιουργία ενός αριθμού πολύ ειδικών μοντέλων τα οποία συναντούσαν τις ανάγκες για τις οποίες είχαν σχεδιαστεί αλλά χωρίς απαραίτητα να χρειάζεται να μεταφερθούν σε άλλες εφαρμογές.

**5.3.1 Μοντέλα που περιλαμβάνουν τη διάρκεια της έντονης ηλιοφάνειας.** Ημερήσια δεδομένα της διάρκειας της έντονης ηλιοφάνειας όπως μετρήθηκαν με έναν καταγραφέα ηλιοφάνειας καθώς και βροχόπτωση και θερμοκρασία, ήταν διαθέσιμα. Επίσης μερικοί ερευνητές θεώρησαν ότι η διάρκεια της ηλιοφάνειας μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την υποκατάσταση της φωτοπερίοδου και επίσης παρέχει μερικές πληροφορίες για την πρόσθετη θερμότητα την οποία τα φυτά προσλαμβάνουν.

Δεν είναι παράξενο ότι τα δεδομένα διάρκειας της ημέρας έχουν χρησιμοποιηθεί κατ'ευθείαν σε μοντέλα για τον υπολογισμό της ωρίμανσης των καλλιεργειών ή για αλλά φαινολογικά σταδία ειδικά για φυτά μεγάλης ημέρας στα οποία αυξήσεις τόσο στη θερμοκρασία όσο και τη φωτοπερίοδο έχουν επίδραση στην αύξηση του ρυθμού ανάπτυξης.

Σε μια μελέτη του χειμωνιάτικου σιταριού, οι Vargas και Harszonits χρησιμοποίησαν ένα μοντέλο που περιελάμβανε την μέση ημερήσια θερμοκρασία και τη διάρκεια της έντονης ηλιοφάνειας. Βρήκαν ότι η συσχέτιση του μήκους της περιόδου ανάπτυξης με τη μέση θερμοκρασία κατά τη διάρκεια της περιόδου ήταν αρνητική όπως αναμενόταν αλλά η συσχέτιση με τις συνολικές ώρες ηλιοφάνειας κατά τη διάρκεια της περιόδου ήταν θετική. Η τελευταία σχέση δεν συμβαδίζει με τη θεωρία αλλά υπάρχουν δυο εξηγήσεις,

Πρώτον, η συσχέτιση μπορεί να είναι συγκεχυμένη γιατί τόσο η ανεξάρτητη όσο και η εξαρτημένη μεταβλητή περιέχουν ένα κοινό όρο εξαιτίας της άθροισης πάνω στη διάρκεια της φαινολογικής περιόδου. Αυτό θα προκαλούσε πολύ υψηλή συσχέτιση ακόμη και αν μια μη αιτιολογική σχέση υπήρχε μεταξύ διάρκειας της περιόδου και της συνολικής διάρκειας ηλιοφάνειας. Αυτή η συσχέτιση θα αποφευχθεί διαιρώντας την ανεξάρτητη μεταβλητή με τη διάρκεια της περιόδου και συσχετίζοντας αυτό με το *reciprocal* της διάρκειας της περιόδου.

Δεύτερον, η υψηλή συσχέτιση μπορεί να προκύπτει από το - συχνά παρατηρούμενο – γεγονός, ότι οι μεγάλες ηλιόλουστες ημέρες που σχετίζονται συνήθως με ψυχρότερες πολικές αέριες μάζες στις εύκρατες ζώνες, δεν συνοδεύονται απαραίτητα από υψηλότερες θερμοκρασίες.

Ελάχιστες θερμοκρασίες στην πραγματικότητα μπορεί να είναι μικρότερες τις ηλιόλουστες μέρες από ότι τις συννεφιασμένες ημέρες και αυτό

θα μπορούσε να συνεισφέρει στην αύξηση του μήκους της περιόδου ανάπτυξης.

Το μοντέλο των Vargas και Harszonits παρελάμβανε το λόγο της θερμοκρασίας με τη διάρκεια της ηλιοφάνειας:

$$I_o = 1000 T_a / \Sigma H \quad (5-54)$$

Όπου  $I_o$  είναι ο φωτοθερμικός δείκτης  
 $T_a$  είναι η μέση θερμοκρασία κατά τη διάρκεια της φαινολογικής περιόδου  
 $\Sigma H$  είναι το άθροισμα της έντονης ηλιοφάνειας, σε ώρες, κατά τη διάρκεια της περιόδου

Και 1000 είναι ένας πολλαπλασιαστής για να αποφευχθούν δεκαδικές πράξεις. Ο φωτοθερμικός συντελεστής συσχετίζονταν με το μήκος της φαινολογικής περιόδου,  $N$ , με την ισότητα:

$$N = a / I_o^b \quad (5-55)$$

Οι τιμές των συντελεστών  $a$  και  $b$  προέκυψαν με μια λογαριθμική μετατροπή και παλινδρόμηση χρησιμοποιώντας παρατηρήσεις αγρού και βρέθηκαν να ποικίλουν από τη μια φαινολογική περίοδο στη άλλη

Το μοντέλο του φωτοθερμικού δείκτη αποδείχθηκε ανώτερο από το μοντέλο που χρησιμοποιεί μόνο την θερμοκρασία για τον υπολογισμό του μήκους της φαινολογικής περιόδου.

Ο Primaault (1969), ανέπτυξε μια τεχνική για τον υπολογισμό ενός βιομετεωρολογικού δείκτη για την ωρίμανση του καλαμποκιού. Η τεχνική αποτελείται από ένα μοντέλο που περιλαμβάνει TRIM στο οποίο προστέθηκαν το άθροισμα της διάρκειας της έντονης ηλιοφάνειας  $\Sigma H$ , και το άθροισμα της βροχόπτωσης  $\Sigma P$ . Το μοντέλο θα μπορούσε να γράφει ως ακολούθως:

$$I = \Sigma (T_m - T_o) + n \Sigma H + p \Sigma P_{30} \quad (5-56)$$

Ημερήσια μεγέθη βροχόπτωσης 30 mm ή λιγότερο αθροίζονται ενώ μεγέθη πάνω από 30 mm θεωρούνται ως 30 mm. Οι συντελεστές  $n$  και  $p$  προσδιορίστηκαν από παρατηρήσεις αγρού και ποικίλουν από ποικιλία σε ποικιλία καθώς και από μια φαινολογική περίοδο σε άλλη.

Η πρόβλεψη της ωρίμανσης των περισσότερων καλλιεργειών χρειάζονταν τον όρο TRIM στην ισότητα. Οι υπολογισμοί για όλες τις ποικιλίες πλεονεκτούσαν με την αποδοχή του όρου της ηλιοφάνειας κατά τη διάρκεια τη δημιουργία του σπάδικα μέχρι την ωρίμανση.

Ο όρος της βροχόπτωσης ήταν σημαντικός την περίοδο από το φύτρωμα ως τη δημιουργία του σπάδικα μόνο για δυο από τις τέσσερις καλλιέργειες που ελέγχθηκαν. Δυο ποικιλίες χρειάζονταν μόνο TRIM κατά τη διάρκεια της περιόδου από την εμφάνιση μέχρι τη δημιουργία του σπάδικα και μια ποικιλία χρειάζονταν μόνο τον όρο της ηλιοφάνειας κατά τη διάρκεια της περιόδου αυτής.

### 5.3.2 Μοντέλα που περιλαμβάνουν δεδομένα ολικής ενέργειας.

Αν η ένταση της ηλιοφάνειας δεν είναι σταθερή τότε στον προσδιορισμό του ρυθμού ανάπτυξης της καλλιέργειας θα είναι λογικό να χρησιμοποιεί κανείς



μετρήσεις ολικής ενέργειας ( την ένταση της συνολικής ηλιακής ακτινοβολίας από τον ήλιο, τον ουρανό, τα σύννεφα που πέφτουν σε μια οριζόντια επιφάνεια ). Οι υπολογισμοί της συνολικής ενέργειας έγιναν από παρατηρήσεις κατά την διάρκεια της έντονης ηλιοφάνειας. Μερικοί ερευνητές χρησιμοποίησαν δεδομένα συνολικής ενέργειας μαζί με θερμοκρασία για να μετρήσουν την ποικιλότητα στο ρυθμό της ανάπτυξης των διάφορων φυτών

Ο Carpio (1971 και 1974) ανέπτυξε έναν όρο, τις ηλιοθερμικές μονάδες (STU), οι οποίες προσδιορίζονται από την παρακάτω απλή ισότητα:

$$STU = \Sigma QT_m \quad (5-57)$$

Όπου  $\Sigma$  δηλώνει το άθροισμα στη διάρκεια μιας φαινολογικής περιόδου

$Q$  είναι η ολική ενέργεια σε  $g \text{ cal cm}^{-2} \text{ day}^{-1}$

$T_m$  είναι η μέση ημερήσια θερμοκρασία σε  $^{\circ}\text{C}$

Ο Carpio παρατήρησε, από εκατοντάδες καταγραφές που έγιναν σε όλες τις δυτικές ΗΠΑ, για δέκα χρόνια, ότι το φυτό λίκιο αρχίζει να ανθίζει, όταν οι STU φτάνουν σε μια τιμή 21100 μονάδες βασισμένες σε αθροίσματα, Αρχίζει όταν η θερμοκρασία ανεβαίνει πάνω από τους  $0^{\circ}\text{C}$  την άνοιξη. Κατά τη διάρκεια της περιόδου από την πρώτη μέχρι την τελευταία άνθιση 15600 μονάδες προστίθενται. Στις μελέτες του φάνηκε ότι η ποικιλότητα των STU από περιοχή σε περιοχή ήταν πολύ μικρότερη από ότι ποικιλότητα από μονάδες TRIS χρησιμοποιώντας σαν κατώφλι τους  $-0.6^{\circ}\text{C}$ .

Το STU εφαρμόστηκε σε ένα αριθμό από είδη φυτών για τον υπολογισμό της ημέρας της άνθισης. Μερικές από αυτές είναι:

Alfalfa ( <i>Medicago Sativa</i> ) 10% άνθηση	256
White Clover ( <i>Trifolium opulus</i> )	294
Apple ( <i>Malus pumila</i> )	211
Plum ( <i>Prunus domestica</i> )	200
Pear ( <i>Pyrus communis</i> )	172
Peach ( <i>Prunus persica</i> )	128

Οι Amores – Vergara (1973) επίσης χρησιμοποίησαν τη θερμοκρασία και τη συνολική ενέργεια σε ένα μοντέλο για να εξηγήσουν την ποικιλότητα στην ανάπτυξη του καλαμποκιού (γλυκό καλαμπόκι). Χρησιμοποίησαν το τριτεταγωνικό μοντέλο του Robertson (1968) αλλά υποκατέστησαν την ημερήσια συνολική ενέργεια  $Q$  αντί του μήκους της ημέρας  $L$ . Το μοντέλο υπέθεσε ότι ο μέσος ρυθμός ανάπτυξης είναι βασισμένος στα υπόλοιπα του μέσου μήκους της φαινολογικής περιόδου δηλαδή στους  $10^{\circ}\text{C}$ .

Επίσης έλεγξε τη συμπεριφορά τριών άλλων μοντέλων για την εκτίμηση της διάρκειας διαφόρων φαινολογικών περιόδων. Το μοντέλο A υπέθετε ότι ο μέσος ρυθμός ανάπτυξης βασίζεται στο υπόλοιπο του μέσου μήκους της φαινολογικής περιόδου σε μέσες θερμοκρασίες και ήταν σταθερός. Το μοντέλο B ήταν ένα TRIM με θερμοκρασία κατωφλίου  $10^{\circ}\text{C}$ . Το μοντέλο C ήταν TRIM πολλαπλασιασμένο με το μήκος της ημέρας, και το

μοντέλο D ήταν ένα τριτετραγωνικό μοντέλο που χρησιμοποιούσε τη συνολική ενέργεια στη θέση του μήκους της ημέρας.

Σε κάθε μοντέλο ο συντελεστής άθροισης υποτίθεται ότι ήταν 1.0 για το σετ των δεδομένων των πειραμάτων πεδίου που χρησιμοποιήθηκαν στην κατασκευή του μοντέλου και για την δημιουργία των συντελεστών έτσι ώστε να υπάρχει μια κοινή βάση για τη σύγκριση των μοντέλων.

Το μοντέλο ενέργειας θερμοκρασίας δούλεψε αρκετά καλά όπως φαίνεται στον παρακάτω πίνακα όπου παρουσιάζονται οι τιμές των συντελεστών παραλλακτικότητας ( 100 x τυπική απόκλιση/1.0 στην περίπτωση αυτή ) της σταθεράς άθροισης (στοχαστικό 1 ) για διάφορα μοντέλα και φαινολογικές περιόδους για το γλυκό καλαμπόκι.

Περίοδος	Μοντέλο			
	A%	B%	C%	D%
Plant – emergence	14,6	14,0	13,8	9,6
Emergence – jointing	13,4	12,7	13,9	2,3
Jointing – heading	13,6	12,0	11,2	1,5
Heading – soft dough	15,7	13,9	13,2	1,9
Soft dough – maturity	19,5	18,6	17,8	8,6

Ο Sierra (1977) χρησιμοποίησε την συνολική ενέργεια μαζί με τη θερμοκρασία και την φωτοπερίοδο για να μελετήσει την ανάπτυξη της σόγιας. Το μοντέλο του περιελάμβανε μια σειρά από γραμμικές σχέσεις αρχίζοντας από το άθροισμα της συνολικής ενέργειας σε μια φαινολογική περίοδο.

Αυτό το άθροισμα με τη σειρά του σχετίζονταν με συσχέτιση με την φωτοπερίοδο από την οποία προσδιορίζονταν μια φωτοενεργητική άθροιση. Αυτή με τη σειρά της σχετίζονταν με συσχέτιση με τη θερμοκρασία, το άθροισμα της οποίας γινόταν το ενεργητικό φωτοθερμικό μοντέλο ανάπτυξης.

Παρότι η μέθοδος μειώνει τους υπολογισμούς για ένα σύστημα τεσσάρων μεταβλητών του μοντέλου στο ελάχιστο, η χρήση μιας περιβαλλοντικής παραμέτρου μαζί με αθροίσματα αυτών σαν εξαρτημένες μεταβλητές σε μια ισότητα συσχέτισης μπορεί να οδηγούσε σε σοβαρές συγκεχυμένες σχέσεις

**5.3.3 Μοντέλα που περιλαμβάνουν υπολογισμούς ισοζυγίου θερμότητας.** Σε πρωταρχικές προσπάθειες να συσχετιστεί η ανάπτυξη των καλλιεργειών με μετεωρολογικούς παράγοντες, ο Robertson σημείωσε (1953, 1973) ότι οι διαφορές των θερμοκρασιών μετρούνται σε σταθερό επίπεδο θερμοκρασίας ώστε να αντιπροσωπεύσουν την αποτελεσματική θερμοκρασία της καλλιέργειας η οποία επηρεάζει τον ρυθμό της ανάπτυξης.

Συνειδητοποιώντας τη σημασία της χρήσης συγκεκριμένων μετεωρολογικών δεδομένων, ένα μοντέλο χωρίστηκε για τον υπολογισμό της αποτελεσματικής θερμοκρασίας των καλλιεργειών με τη χρήση μιας προσέγγισης ισοζυγίου θερμότητας και κάνοντας χρήση μόνο συγκεκριμένων μετεωρολογικών παρατηρήσεων. Το βασικό μοντέλο για την αποτελεσματική θερμοκρασία είναι:

$$T_c = T_m + c^* ( Q_N - Q_E / 1 + 0.01w ) \quad (5-58)$$

όπου  $T_c$  είναι η αποτελεσματική θερμοκρασία για την ανάπτυξη της καλλιέργειας

$T_m$  Είναι η ημερήσια μέση θερμοκρασία αέρα

$Q_N$  Είναι η το ημερήσιο ισοζύγιο ακτινοβολίας (καθαρής ακτινοβολίας) στην καλλιέργεια

$Q_E$  Είναι το θερμικό ισοδύναμο της πραγματικής εξατμισοδιαπνοής από το φυτό

$c$  Είναι ένας συντελεστής του φυτού που εξαρτάται μεταξύ άλλων πραγμάτων από το ύψος και την πυκνότητα της καλλιέργειας και προσδιορίζεται από την ανάλυση συσχέτισης με τη χρήση δεδομένων ανάπτυξης

$w$  Είναι η ταχύτητα του ανέμου έξι μέτρα πάνω από την καλλιέργεια.

Εύκολα καταλαβαίνει κάποιος ότι υπάρχει μια κύρια ομοιότητα μεταξύ της παραπάνω ισότητας και της ισότητας του Penman (1948) για την εξατμισοδιαπνοή. Ο όρος του ισοζυγίου της ακτινοβολίας μπορεί να υπολογιστεί από συγκεκριμένα μετεωρολογικά δεδομένα χρησιμοποιώντας την τεχνική που χρησιμοποίησε ο Penman στην ισότητα του. Η πραγματική εξατμισοδιαπνοή μπορεί να υπολογιστεί με τη χρήση της βροχόπτωσης και της δυνητικής εξατμισοδιαπνοής μαζί με χαρακτηριστικά της καλλιέργειας και του εδάφους για τον υπολογισμό του ισοζυγίου του εδαφικού νερού. Η ισότητα παρέχει ένα μέσο για τον υπολογισμό της αποτελεσματικής θερμοκρασίας της καλλιέργειας για ένα μεγάλο εύρος συνθηκών περιβάλλοντος σε τέσσερις επιλεγμένες ημέρες στην Οτάβα το 1952.

Οι κύριοι λόγοι για τις διάφορες θερμοκρασίες μεταξύ ανοικτού αέρα και καλλιέργειας ήταν οι ποικιλότητες στην παροχή εδαφικού νερού οι οποίες συναντούν τις ανάγκες εξατμισοδιαπνοής του φυτού και οι ποικιλότητες στην παροχή συνολικής ενέργειας για την θέρμανση της καλλιέργειας και του παγιδευμένου αέρα μέσα στο φύλλωμα. Κατά μέσο όρο η αποτελεσματική θερμοκρασία της καλλιέργειας στην Οτάβα υπολογίστηκε να είναι  $2,5\text{ }^{\circ}\text{C}$  πιο ζεστή από τη θερμοκρασία του αέρα που μετρήθηκε με σταθερό θερμοκρασιακό επίπεδο. Αυτό ήταν ισοδύναμο με ένα 23 % αύξησης στην εποχιακή τιμή του TRIS.

Οι Newman et al (1967) είναι ανάμεσα στους λίγους ερευνητές που έχουν προσπαθήσει να υπολογίσουν το ισοζύγιο θερμότητας μιας καλλιέργειας για την πρόβλεψη του ρυθμού ωρίμανσης της. Η προσέγγιση τους ήταν να μην συμπεριλάβουν τη θερμοκρασία, αλλά αυτό που ονόμαζαν καθαρή θερμότητα ακτινοβολίας που εισέρχεται στη φυτική επιφάνεια. Αυτή η προσέγγιση αποτελούνταν από τον υπολογισμό της πραγματικής ροής θερμότητας στην φυτική επιφάνεια πάνω από ένα κατώφλι ροής των  $0.524\text{ g cal cm}^{-2}\text{ min}^{-1}$  που ανταποκρίνονταν σε μια θερμοκρασία κατωφλίου  $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Η πραγματική ροή θερμότητας υπολογίστηκε από μικροκλιματικές παρατηρήσεις μέσα στον οπωρώνα. Οι παρατηρήσεις αποτελούνταν από θερμοκρασία αέρα, άνεμο, και θερμοκρασίες υπέρυθρου που παίρνονταν ανά δώρο. Τα αποτελέσματα, εφαρμόστηκαν στους υπολογισμούς της ανάπτυξης των πορτοκαλιών όπου βρέθηκε να είναι ανώτερες από την άθροιση των TRI μονάδων πάνω από ένα κατώφλι  $12.8\text{ }^{\circ}\text{C}$  αλλά περιορίζονταν σε θερμοκρασίες κάτω από  $35\text{ }^{\circ}\text{C}$ .



**5.3.4 Μοντέλα που περιλαμβάνουν βροχόπτωση ή καταπόνηση φυτού από έλλειψη νερού.** Οι Clarks and Russell (1976) ανέφεραν στα αποτελέσματα των δοκίμων τους για τον προσδιορισμό της επίδρασης της καταπόνησης του νερού στη ανάπτυξη των φάσεων σε έξι είδη Medico.

Τα φυτά καλλιεργήθηκαν σε χώμα, σε πλαστικά γλαστράκια και τέσσερα επίπεδα από άποψη καταπόνησης εδαφικού νερού επιτεύχθηκαν με ελεγχόμενη άρδευση.

Όχι μόνο η καταπόνηση μείωσε την απόδοση σε λόγο 100 : 53:35:20 αντίστοιχα για τις τέσσερις μεταχειρίσεις, αλλά το μήκος του χρόνου για να φτάσουν στην άνθιση αυξήθηκε σημαντικά και έφθασε μέχρι και 14 μέρες για την πιο ισχυρή καταπόνηση. Παρόλα αυτά το μήκος της περιόδου ανθοφορίας και της περιόδου από την πρώτη άνθιση μέχρι την ωριμότητα των σπορών των καρπών μειώθηκε κάπως με την καταπόνηση. Οι συγγραφείς σημείωσαν παρ'όλα αυτά ότι η επίδραση της καταπόνησης του νερού στην καθυστέρηση της ανθοφορίας δεν είναι τόσο μεγάλη όσο είναι οι επιδράσεις της εαρινοποίησης, φωτοπεριόδου και θερμοκρασίας.

Μερικές φορές τα μοντέλα ανάπτυξης για την ίδια καλλιέργεια τα οποία είναι βασισμένα σε ένα σει από συνθήκες δεν θα εξηγήσουν ικανοποιητικά την ανάπτυξη κάτω από άλλες συνθήκες. Αυτό συνέβη σε μια περίπτωση όπου ένα μοντέλο για την ανάπτυξη της σόγιας βασίστηκε σε παρατηρήσεις και δεδομένα από μελέτες ελεγχόμενου περιβάλλοντος για την περίοδο από τη σπορά μέχρι την πρώτη άνθιση.

Όταν έγινε προσπάθεια να χρησιμοποιηθεί το μοντέλο για τη διακοπή τη ανάπτυξης σε φυτά που καλλιεργούνταν στον αγρό, βρέθηκε ότι δούλεψε ικανοποιητικά για την περίοδο από την σπορά μέχρι την πρώτη άνθιση αλλά όχι για τις περιόδους από την πρώτη άνθιση μέχρι το μέγιστο της καρποφορίας και το μέγιστο της ωριμότητας των καρπών.

Ο ρυθμός ανάπτυξης δείχνει στατιστικά να αυξάνεται με τη μείωση της βροχόπτωσης κατά τη διάρκεια της περιόδου από την πρώτη άνθιση ως το μέγιστο της καρποφορίας. Η προσαρμοσμένη βροχόπτωση χρησιμοποιήθηκε σαν δείκτης για το διαθέσιμο νερό κατά την περίοδο από την πρώτη άνθιση ως το μέγιστο της καρποφορίας μαζί με την βροχόπτωση κατά τη διάρκεια της περιόδου καθώς και την βροχή σε σχέση με τη δυνητική εξατμισοδιαπνοή, PE, πριν τη μέγιστη καρποφορία.

Πέντε ισότητες χρησιμοποιήθηκαν για να εκφράσουν τη σχέση του ημερήσιου ρυθμού ανάπτυξης (SDU= μονάδες ανάπτυξης σόγιας) με τη θερμοκρασία και την βροχόπτωση:

Optimum ( 100 mm )	$SDU = 4390 T_m - 0,2560 T^2 - 155,18$
25 mm κάτω από το Optimum	$SDU = 4715 T_m - 0,02755 T^2 - 167,17$
50 mm κάτω από το Optimum	$SDU = 5060 T_m - 0,02950 T^2 - 179,06$
75 mm κάτω από το Optimum	$SDU = 5395 T_m - 0,03145 T^2 - 190,96$
100 mm κάτω από το Optimum	$SDU = 5730 T_m - 0,03340 T^2 - 202,86$

Η σχέση της θερμοκρασίας που βρέθηκε για την περίοδο από το φύτευμα μέχρι την πρώτη άνθιση επίσης δεν εφαρμόζεται κατά τη διάρκεια από την μέγιστη καρποφορία μέχρι την ωρίμανση. Η κλίση της καμπύλης θερμοκρασίας ανάπτυξης όπως και της θερμοκρασίας κατωφλιού φαίνεται να είναι διαφορετική για την τελευταία περίοδο. Η βροχόπτωση δεν εμφανίζεται



να παίζει ρόλο εδώ. Μη επαρκή δεδομένα ήταν διαθέσιμα για τον προσδιορισμό της σχέσης εμπειρικά.

Ο Primault (1969) επίσης χρησιμοποίησε τη βροχόπτωση σε ένα μοντέλο για το καλαμπόκι μαζί με τη διάρκεια ηλιοφάνειας και τη θερμοκρασία. Φάνηκε ότι η βροχόπτωση δεν ήταν πολύ σημαντική όσο η αναπτυξιακή απόκριση μόνο δύο από τις τέσσερις ποικιλίες χρειάζονταν βροχόπτωση για τη δημιουργία του σπάδικα και καμία από τις τέσσερις ποικιλίες δεν χρειάζονταν τον όρο της βροχόπτωσης στο μοντέλο για την περίοδο από την δημιουργία του σπάδικα μέχρι την ωρίμανση.

## 5.4 Συναρτησιακά μοντέλα

Η αγρομετεωρολογία ασχολείται με τη μελέτη της ανταπόκρισης των αγροτικών συστημάτων στις μεταβολές των μετεωρολογικών συνθηκών. Μετεωρολογικές μεταβολές όπως ηλιακή ακτινοβολία, θερμοκρασία, άνεμος, υγρασία και βροχόπτωση σχετίζονται σε πειράματα με αγροτικές μεταβολές όπως υγρασία εδάφους, φαινολογία, ανάπτυξη και παραγωγή.

Σε πολλές εφαρμογές της αγροτομετεωρολογίας, η τηλεπισκόπηση παρέχει πληροφορίες για θεωρητικές και εφαρμοσμένες έρευνες σε χωρικές κλίμακες που δεν είναι διαθέσιμες από τεχνικές συμβατικών σημειακών μετρήσεων. Επομένως, η αγρομετεωρολογία έχει τώρα μια νέα ευκαιρία να αντιμετωπίσει προβλήματα σε χωρικές κλίμακες που μέχρι τώρα δεν ήταν δυνατές.

Τα συναρτησιακά μοντέλα παρουσιάζουν την ίδια διαδικασία με τα μηχανιστικά μοντέλα αλλά με έναν πιο απλό τρόπο. Τα μοντέλα αυτά αντικαταστάθηκαν με εμπειρικές μεθόδους ώστε να γίνει ασφαλής και λεπτομερής τυποποίηση τους. Η διαδικασία αυτή συχνά επιτρέπει μια αύξηση στο επίπεδο του χρόνου υπολογισμού από μια ως δέκα ημέρες. Το γεγονός αυτό οδηγεί σε πολύ λιγότερα εισαγόμενα δεδομένα και σημαντική μείωση στον συνολικό χρόνο υπολογισμού.

Τα τελευταία χρόνια διάφορα συναρτησιακά μοντέλα αναπτύχθηκαν και χρησιμοποιήθηκαν στην τηλεπισκόπηση και την πρόγνωση παραγωγής. Ενδεικτικά αναφέρεται μια εφαρμογή στην επίδραση της θερμοκρασίας εγκαύματος στο ανθός (μπουμπούκι) του ροδάκινου υπό ελεγχόμενες συνθήκες με την βοήθεια δυναμικών μοντέλων. Το αποτέλεσμα είναι ένας μετεωρολογικός δείκτης για την ζώνη της κόμης του δένδρου και η εφαρμογή αυτή δοκιμάστηκε στην Ρουμανία.

Επίσης μια ανασκόπηση του προγράμματος MARS-STAT άρχισε να δοκιμάζεται με έμφαση στην επισκόπηση του πεδίου παραγωγής και στην πρόωρη πρόγνωση παραγωγής καθώς και στην χαμηλή ανάλυση της τηλεπισκόπησης για ποιοτική εκτίμηση σοδειάς.

Τα στοιχεία και οι μέθοδοι τηλεπισκόπησης είναι διαθέσιμα για τα διάφορα συναρτησιακά μοντέλα. Μια άλλη εφαρμογή αναφέρεται σε χρονικές σειρές του NDVI και σε μετεωρολογικούς δείκτες για καταγραφή της ανάπτυξης του βαμβακιού, της αμπέλου και των μήλων στην Ελλάδα μέσω της φαινολογίας.

Άλλη μια πρόσφατη μελέτη στην Ελλάδα αναφέρεται στην πρόωρη εκτίμηση βιομάζας ρυζιού με την χρησιμοποίηση φορητού ραδιόμετρου και μετεωρολογικών παραμέτρων.

Στην Πολωνία η καταγραφή της σοδειάς πρόσφατα πραγματοποιήθηκε με την χρησιμοποίηση NOAA/AVHRR και ERS-1 SAR στοιχεία, τα οποία μπορούν να εκτιμήσουν τις εδαφικές συνθήκες και τις συνθήκες βλάστησης στην χώρα αυτή.

Ένα μοντέλο για πρόγνωση, εκτίμηση και πιθανότητες πρόγνωσης παραγωγής προσδιορίσθηκε –όσο αφορά την αύξηση- σε περιοχές της Castile και Leon της Ισπανίας. Η τεχνική αυτή περιλαμβάνει σχέσεις μεταξύ αθροιστικού NDVI και εκτίμησης σοδειάς.

Μια άλλη πρόσφατη μελέτη στην Γερμανία συμπεριέλαβε συναρτησιακές σχέσεις μεταξύ του LAI καθώς και μεταξύ ξηρής βιομάζας και μιας νέας παραμέτρου της DLP. Η μελέτη αυτή εφαρμόσθηκε στο καλαμπόκι και σε δημητριακά για εκτίμηση παραγωγής at harvest και συμπεριέλαβε LANDSAT-TM εικόνες, on airborne hyperspectral GER-image, μετρήσεις από φασματόμετρα εδάφους για τρία χρόνια, όλα συνδυασμένα σε GIS.

Τέλος μια μελέτη παρουσιάσθηκε για εκτίμηση απωλειών σοδειάς και εκτίμηση παραγωγής χρησιμοποιώντας LANDSAT-TM και NOAA/AVHRR εικόνες σε αγρούς ρυζιού στην Βόρεια Ελλάδα.

#### 5.4.1 Δεδομένα τηλεπισκόπησης

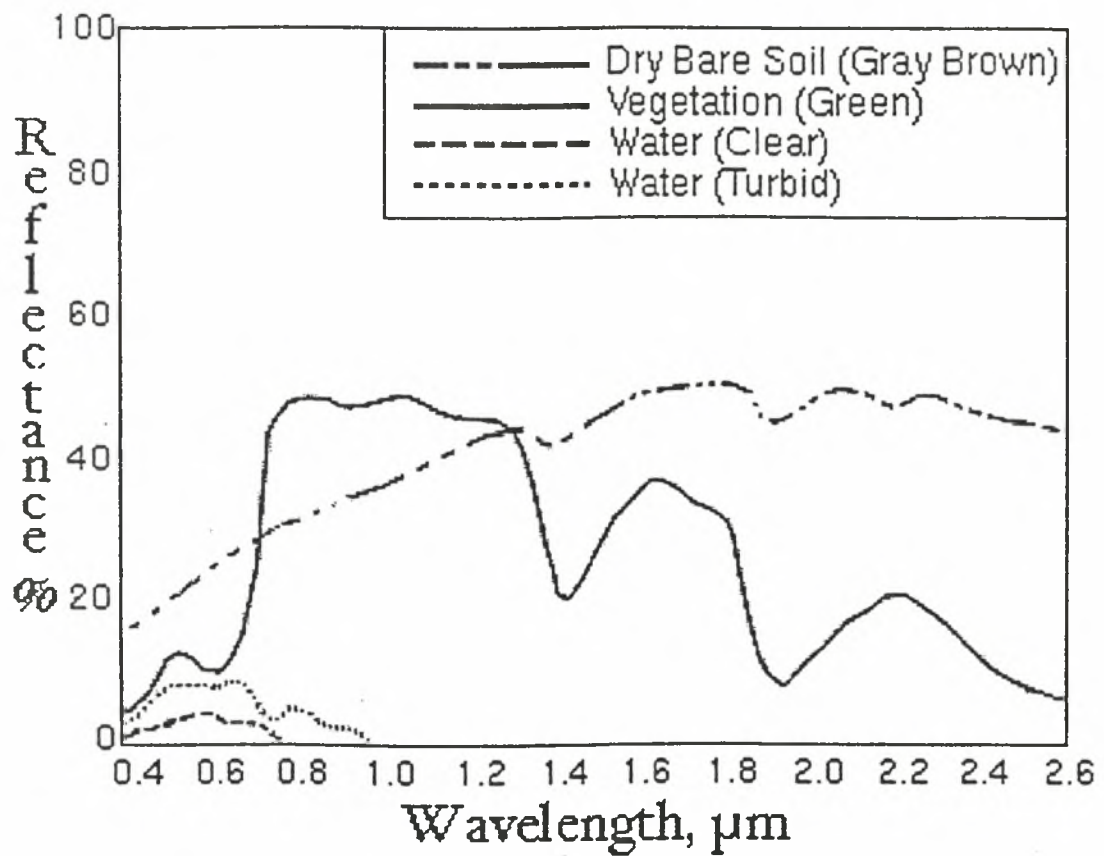
Τα συστήματα τηλεπισκόπησης διαφέρουν στην χωρική και φασματική διακριτική ικανότητα. Σε μικρή κλίμακα, χρησιμοποιούνται θερμόμετρα χειρός για μετρήσεις θερμοκρασίας για να υπολογιστεί η διαπνοή ή να ανιχνευθούν ασθένειες φυτών. Ένα φορητό φασματόμετρο μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε μικρότερα μήκη κύματος με χωρική διακριτική ανάλυση από 0,1 ως 1m για να μετρήσει παραμέτρους της βιομάζας της βλάστησης.

Παρόμοια συστήματα μπορούν να χρησιμοποιηθούν από αεροσκάφος διαθέτοντας αερο-ανιχνευτές με πολλά φασματικά κανάλια (VIS, SWIR, και TIR) και με χωρική διακριτική ικανότητα από 2 ως 20 m ή από δορυφόρο με χωρική διακριτική ικανότητα από 20 ως 20.000 m.

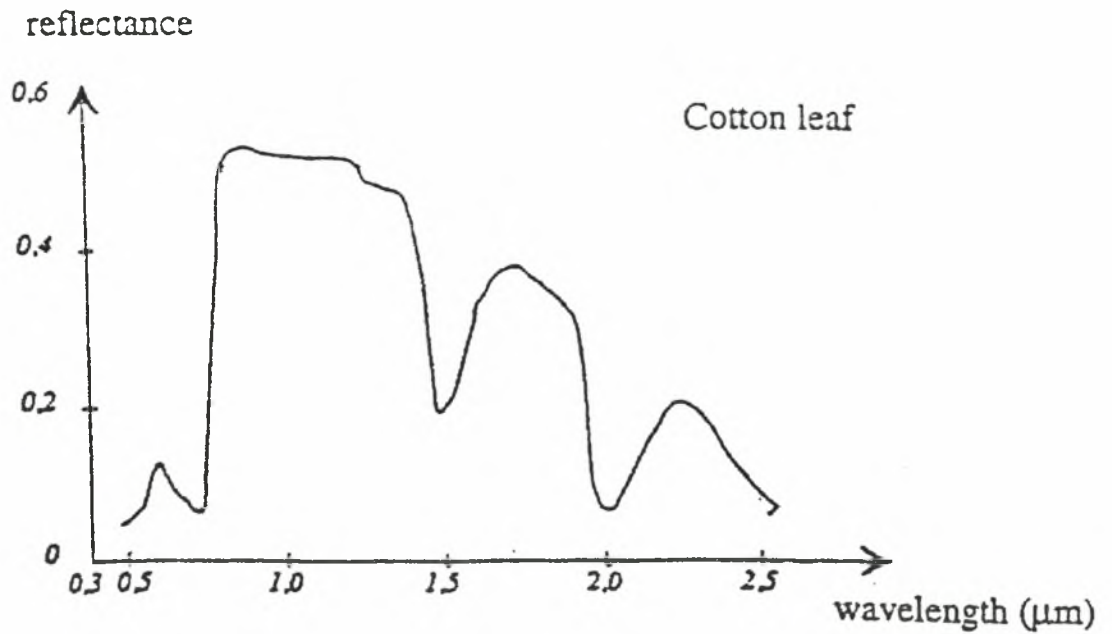
Τα δορυφορικά συστήματα επίσης διαφέρουν σε χρονική διακριτικότητα, η συχνότητα με την οποία καταγράφεται το ίδιο σημείο στην επιφάνεια της γης. Εξαιτίας του μεγάλου όγκου δεδομένων που παράγεται, μια αύξηση της χρονικής διακριτικής ικανότητας είναι συνήθως εις βάρος της χωρικής και φασματικής διακριτικής ικανότητας. Σχετικοί με την αγροτική μετεωρολογία είναι οι περιβαλλοντικοί δορυφόροι με υψηλή χωρική διακριτικότητα και οι μετεωρολογικοί δορυφόροι με υψηλή χρονική διακριτικότητα.

Οι γνωστότεροι περιβαλλοντικοί δορυφόροι είναι της σειράς LANDSAT (USA) με κανάλια στα VIS, NIR, SWIR, TIR και οι SPOT (Systeme Probatoire d' Observation de la Terre France) με κανάλια στα VIS και NIR. Ο SPOT χρησιμοποιεί φορτισμένη συσκευή προωθητικού σαρωτή γραμμικού πλαισίου ανιχνευτές που καλύπτουν μόνο τις VIS και NIR φασματικές περιοχές. Για αγροτικές και μετεωρολογικές εφαρμογές τα δεδομένα των Landsat και SPOT είναι χρήσιμα για την ταξινόμηση χρήσεων γης και το χαρακτηρισμό της επιφάνειας του εδάφους και καλλιεργειών.

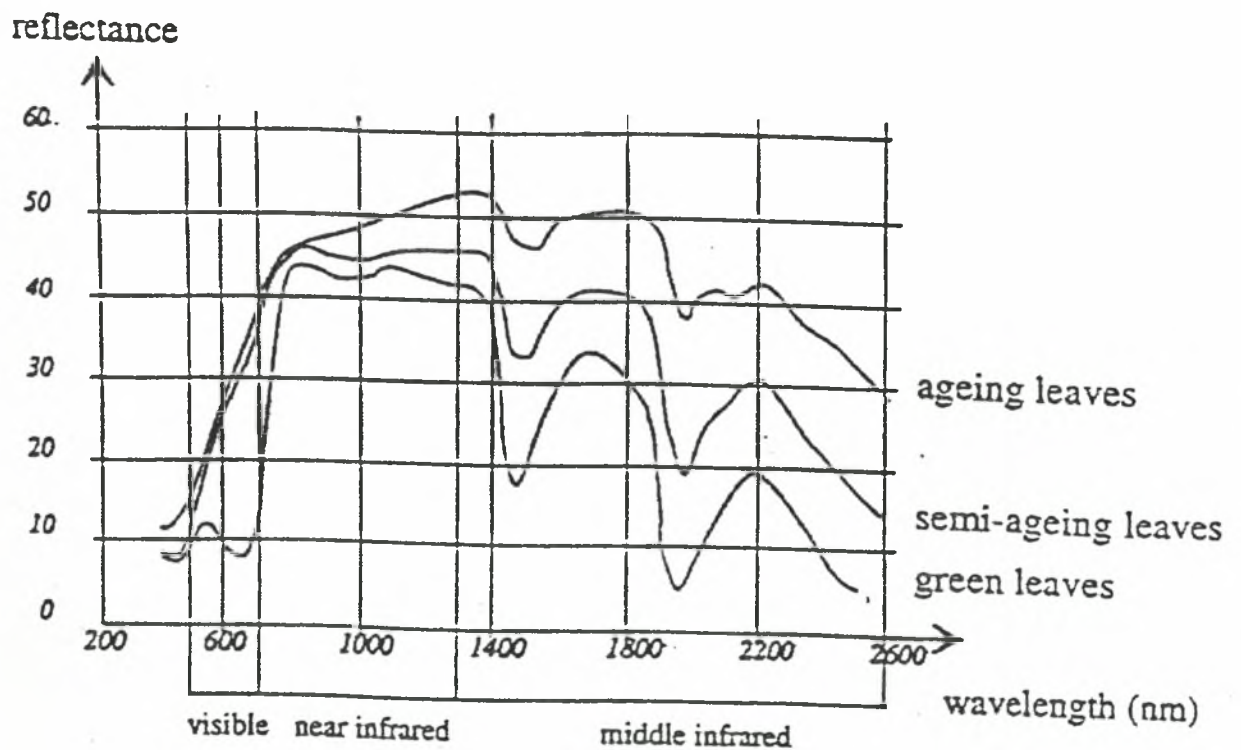
Η χωρική κάλυψη των δορυφορικών δεδομένων είναι κατάλληλη για εισαγωγή των δεδομένων σε μοντέλα(σχήματα 5.14, 5.15, 5.16.



**Σχήμα 5.13** Ποσοστό αντανάκλασης βασικών στοιχείων της γήινης επιφάνειας (νερό καθαρό, νερό στροβιλώδες, βλάστηση, γυμνό έδαφος) σε σχέση με το μήκος κύματος



Σχήμα 5.14 Φασματική ανάκλαση πράσινου φύλλου βαμβακιού.



Σχήμα 5.15 Εξέλιξη φασματικής αντίδρασης σε φύλλο σίτου.



Η παράμετρος που χρησιμοποιείται συχνότερα είναι η εκπεμπόμενη θερμοκρασία επιφάνειας (Ts) και ο δείκτης βλάστησης NDVI (Normalized Difference Vegetation Index).

$$NDVI = (( NIR - R) / ( NIR + R)) \quad (5-59)$$

Δύο ευρείς τύποι μετεωρολογικών δορυφόρων χρησιμοποιούνται συνήθως. Ο ένας είναι ο πολικής τροχιάς δορυφόρος NOAA (National Oceanographic and Atmospheric Administration) με χαμηλή τροχιά στα 850 km. Ο άλλος τύπος περιλαμβάνει τους γεωστάσιμους μετεωρολογικούς δορυφόρους (GMS) με υψόμετρο περίπου 36.000 km, που έχουν τεθεί σε τροχιά από τις Η.Π.Α., ΕΣΣΔ, European Space Agency και Ιαπωνία για να διαμορφώσουν ένα σύστημα παγκόσμιου ατμοσφαιρικού ελέγχου.

Η παρακολούθηση του καιρού και κλίματος από πολικής τροχιάς και γεωστάσιμους δορυφόρους θεωρείται σημαντική καινοτομία για τον έλεγχο του καιρού της γης, κλίματος και βλάστησης του τελευταίου τετάρτου του αιώνα. Είναι θετικό ότι οι δορυφόροι αυτοί όταν δεν καταγράφουν νέφη συγκεντρώνουν πληροφορίες για τη γήινη βλάστηση και την θερμοκρασία των ωκεανών. Έτσι παρέχουν πληροφορίες μετεωρολογικές και της κατάστασης της βλάστησης, που είναι δύο σημαντικά στοιχεία στην αγρομετεωρολογία. Η πιθανή χρήση εναέριων και δορυφορικών Radar θα βελτιώσει τα συστήματα παρακολούθησης κατά την διάρκεια νέφωσης. Αυτό ο κλάδος της τηλεπισκόπησης βρίσκεται σε ερευνητική φάση.

Γενικώς, είναι δυνατόν να ομαδοποιηθούν τα πιθανά εργαλεία της τηλεπισκόπησης σε τρεις κύριες κατηγορίες:

1. δορυφόρο,
2. Radar
3. και επίγεια όργανα.

Όπως προαναφέρθηκε, στην κατηγορία των επίγειων οργάνων περιλαμβάνονται διάφοροι τύποι φασματογράφων και θερμόμετρα ανεξάρτητα απ' το αν τοποθετούνται σε αεροσκάφη ή μεταφέρονται από τον χρήστη.

Οι πιθανοί χρήστες πληροφοριών κυμαίνονται από αγρότες έως τους αρμόδιους φορείς για την λήψη αποφάσεων. Η οργάνωση της συγκέντρωσης των πληροφοριών, της διανομής και της επεξεργασίας των δεδομένων καλύπτει επίσης ένα ευρύ φάσμα.

Επομένως, η χρήση της τηλεπισκόπησης προσφέρει νέες δυνατότητες στην αγρομετεωρολογία, ξεπερνώντας τους περιορισμούς των σημειακών μετρήσεων και δίνεται έτσι η δυνατότητα να εξετασθούν προβλήματα σε μεγαλύτερη κλίμακα, κάτι που πριν δεν ήταν δυνατόν. Χρειάζεται όμως περισσότερη έρευνα, κατά την οποία θα αναπτυχθούν και δοκιμαστούν κατάλληλες βιοφυσικές θεωρίες, συσχετίζοντας τα δορυφορικά δεδομένα με τις επίγειες μετρήσεις. Αυτό είναι απαραίτητο για να γίνει αξιόπιστη εκτίμηση των αγροτικών και μετεωρολογικών παραμέτρων από δορυφορικά δεδομένα.

Μέχρι σήμερα, η έρευνα στον χώρο της τηλεπισκόπησης έχει εστιαστεί στην ανάλυση των εικόνων και όχι στην εξαγωγή ποσοτικών πληροφοριών από τα δορυφορικά δεδομένα. Έτσι, συγκεντρώνεται ένας τεράστιος όγκος δεδομένων, αλλά συγχρόνως υπάρχει έλλειψη πληροφοριών. Η προσφορά της αγρομετεωρολογίας θα μπορούσε να βοηθήσει στην αντιστροφή αυτής της πορείας.

### 5.4.2 Οι έννοιες παραγωγή και απόδοση

- **Ακαθάριστη βασική παραγωγή και καθαρή βασική παραγωγή.** Η Ακαθάριστη Βασική Παραγωγή (GPP) ανταποκρίνεται στο άθροισμα μιας προκαθορισμένης επιφάνειας και της φωτοσύνθεσης η οποία λαμβάνει χώρα στην επιφάνεια αυτή σε κάποιο συγκεκριμένο χρονικό διάστημα που έχει παρέλθει. Όταν οι απώλειες που οφείλονται στην αναπνοή εκπέσουν από την προηγούμενη ποσότητα, αυτό που μένει είναι η Καθαρή Βασική Παραγωγή (NPP).

$$NPP = GPP - (R_c + R_e + R_p) \quad (5-60)$$

Όπου  $R_c$  = αναπνοή αύξησης

$R_e$  = μέση αναπνοή

$R_p$  = φωτοαναπνοή

- **Βιομάζα.** Θεωρητικά σε ιδανικές (optimum) συνθήκες ζωής η Καθαρή Βασική Παραγωγή (NPP) λογικά αντιπροσωπεύει την ποσότητα φυτικής μάζας η οποία μπορεί στην πραγματικότητα να παρατηρηθεί στο έδαφος για τα ετήσια φυτά. Στην πράξη όμως κάποια φυτά είναι πολύ πιθανό να καταναλωθούν ή να εξαφανισθούν σαν αποτέλεσμα φαινομένων γήρανσης. Εξ' αιτίας αυτής της πιθανότητας, η ποσότητα της φυτικής μάζας η οποία είναι πραγματικά παρατηρήσιμη στο έδαφος, προσδιορίζεται από τον όρο Φυτική Βιομάζα ή απλά Φυτομάζα.

$$\text{Φυτομάζα} = \sum_{n=1}^{n=t} [GPP - (R_c + R_e + R_p + C + S)] \quad (5-61)$$

$$\text{δηλαδή Φυτομάζα} = \sum_{n=1}^{n=t} [NPP - (C + S)] \quad (5-62)$$

Όπου  $C$  = απώλειες λόγω καταναλώσεως από ζώα

$S$  = απώλειες λόγω γήρανσης

Για πολυετή φυτά η παραγωγή και η βιομάζα αντιπροσωπεύουν δυο πολύ διαφορετικές καταστάσεις. Η παραγωγή αντιπροσωπεύει την ποσότητα της μάζας παραγόμενη στην μονάδα επιφάνειας, στην μονάδα του χρόνου. Η βιομάζα ορίζει την συνολική μάζα ενός υλικού σε μια καθορισμένη επιφάνεια.

Για παράδειγμα ένα άλσος με ενήλικες βελανιδιές έχει Καθαρή Βασική Παραγωγή (NPP) περίπου 10 τόνους  $ha^{-1}$  χρόνος<sup>-1</sup> ενώ στο ίδιο άλσος η βιομάζα είναι περίπου 300 τόνους  $ha^{-1}$ .

- **Υποθετική και Πραγματική απόδοση.** Σε σύγκριση με την παραγόμενη βιομάζα αυτοί οι όροι προσδιορίζουν την ποσότητα του υλικού που εξαφανίσθηκε εξ' αιτίας ανθρωπίνων δραστηριοτήτων και η σύγκριση αυτή μπορεί να γίνει μόνο για συγκεκριμένη περιοχή. Όταν τα φυτά μεγαλώνουν σε άριστες συνθήκες ζωής ( ιδανική διαθεσιμότητα νερού και στοιχείων χωρίς ακραίες καταστάσεις ) η σοδειά - απόδοση που λαμβάνεται ονομάζεται υποθετική.

Σε φυσικές συνθήκες και μεγάλες καλλιέργειες τα φυτά πάντα υποφέρουν, σε μικρότερο ή μεγαλύτερο βαθμό, από διάφορες καταπονήσεις

(stress)(νερού, υψηλών θερμοκρασιών, καταστροφές από ζώα ή ασθένειες). Αυτές οι καταπονήσεις και οι απώλειες που οφείλονται σε αυτές αν αφαιρεθούν από την υποτιθέμενη παραγωγή θα δώσουν την πραγματική παραγωγή.

Γίνεται εύκολα αντιληπτό ότι από τις μεγαλύτερες δυσκολίες στην μοντελοποίηση της παραγωγής είναι ο χαρακτηρισμός και η σωστή εκτίμηση του βαθμού και του επιπέδου καταπόνησης σε σχέση με την υποτιθέμενη παραγωγή.

### 5.4.3 Δομή των Συναρτησιακών μοντέλων.

Όπως ήδη αναφέρθηκε στην εισαγωγή αυτής της ενότητας τα συναρτησιακά μοντέλα παρουσιάζουν την ίδια διαδικασία με τα μηχανιστικά μοντέλα αλλά με έναν πιο απλό τρόπο. Τα μοντέλα αυτά αντικαταστάθηκαν με εμπειρικές μεθόδους ώστε να γίνει ασφαλής και λεπτομερής τυποποίηση τους. Η διαδικασία αυτή συχνά επιτρέπει μια αύξηση στο επίπεδο του χρόνου υπολογισμού από μια ως δέκα ημέρες. Το γεγονός αυτό οδηγεί σε πολύ λιγότερα εισαγόμενα δεδομένα και σημαντική μείωση στον συνολικό χρόνο υπολογισμού.

Τα τελευταία χρόνια διάφορα συναρτησιακά μοντέλα αναπτύχθηκαν και χρησιμοποιήθηκαν στην τηλεπισκόπηση και την πρόγνωση παραγωγής. Μια από τις πιο συνηθισμένες διαδικασίες είναι βασισμένη στο ημιεμπειρικό μοντέλο του Monteith (1972) σύμφωνα με το οποίο η παραγωγή της βιομάζας είναι συνδεδεμένη με τις ποσότητες της προσπιπτόμενης ηλιακής ακτινοβολίας σε διαφορετικές περιόδους αποδοτικότητας.

Ο τύπος αυτός προσαρμοσμένος στην χρήση δορυφορικών δεδομένων μπορεί να έχει την μορφή του παρακάτω μοντέλου

$$Y_d = \sum_{n=1}^{n=t} \epsilon_b \cdot \epsilon_c \cdot \epsilon_i \cdot R_g \cdot dt \cdot s_i \cdot h_i \quad (5-63)$$

όπου  $Y_d$  – απόδοση

$\epsilon_b$ - φωτοχημική ικανότητα ( φωτοσυνθετική δράση ακτινοβολίας απορροφημένη στην σκιά, η οποία μετατράπηκε σε ξηρή ουσία ).

$\epsilon_c$ - κλιματική ικανότητα ( ποσοστό φωτοσυνθετικής δράσης ακτινοβολίας που περιέχεται στην συνολική ηλιακή ακτινοβολία ).

$\epsilon_i$ - ικανότητα σταματήματος ή παρεμπόδισης ή απορρόφησης της ηλιακής ακτινοβολίας.

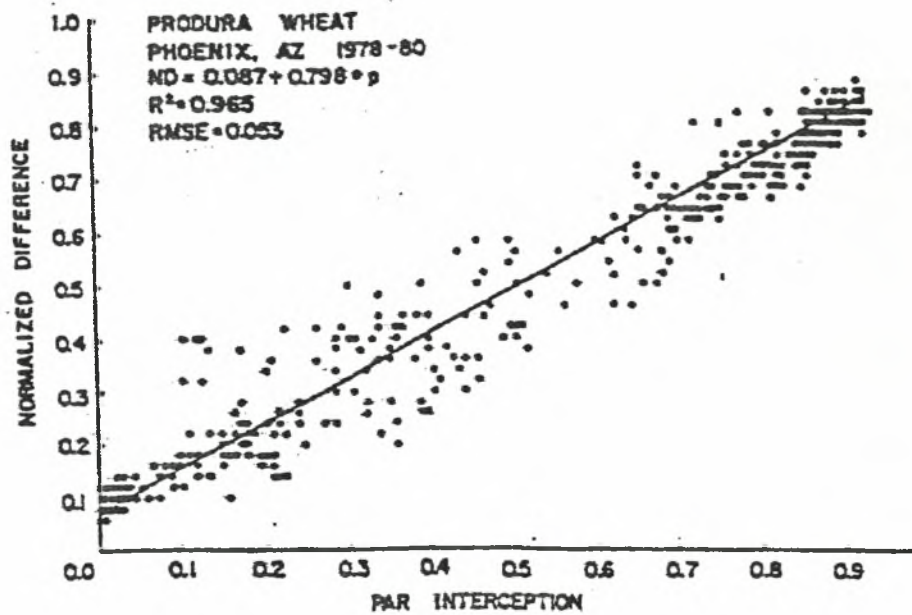
$R_g$ - προσπιπτόμενη ηλιακή ακτινοβολία.

$dt$ - χρονικό επίπεδο.

$s_i$ - δείκτης καταπόνησης.

$h_i$ - δείκτης βλάστησης.

Σαν παράδειγμα της απλοποίησης σε σύγκριση με ένα μηχανιστικό μοντέλο μπορεί κανείς να δει το παρακάτω σχέδιο (σχήμα 5.16) όπου η ποσότητα της ακτινοβολίας που ακτινοβολήθηκε από την σκιά η οποία προσδιορίστηκε ως συνάρτηση του δείκτη φυλλικής επιφάνειας και extinction χαμηλή του φωτός μέσω σκιάς, έχει αντικατασταθεί από μια απλή ευθύγραμμη σχέση με normalized δείκτη βλάστησης.



**Σχήμα 5.16** Σχέση μεταξύ κανονικοποιημένης διαφοράς φασματικού δείκτη και παρεμπόδιση του PAR για σκιαζόμενο ανοιχιάτικο σιτάρι σύμφωνα με τον Hatfield (1984).



Υπάρχουν παρόμοιες απλοποιήσεις για την εκτίμηση του δείκτη ξηρασίας, εξατμισοδιαπνοής και Harvest δείκτη.

Η τεχνική που εφαρμόζεται εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό απ' τον τύπο του οργάνου. Η οπτική γωνία του οργάνου και η απόσταση μέτρησης δίνουν την ανάλυση που είναι πολύ σημαντική πληροφορία για την εφαρμογή των δορυφορικών δεδομένων.

#### **5.4.4 Δορυφορικά δεδομένα και μοντέλα πρόγνωσης παραγωγής.**

Σε αυτό το σημείο της εργασίας είναι απαραίτητο και χρήσιμο να αναφερθούν οι λόγοι για τους οποίους τα δορυφορικά δεδομένα παρουσιάζουν τόσο μεγάλο ενδιαφέρον. Σήμερα η τηλεπισκόπηση είναι το μοναδικό εργαλείο το οποίο μπορεί να εξασφαλίσει μια λεπτομερή και εξαντλητική στιγμιαία μάτια μεγάλων περιοχών με χρονική επανάληψη πολύ καλύτερη από οποιοδήποτε άλλο μέσο που χρησιμοποιείται στην ερευνά αυτών των φαινομένων. Επίσης τα διαφορετικά πεδία μήκους κύματος που έχουν καταγράψει προσδίδουν επιτυχία σε ένα αρκετά μεγάλο πεδίο παραμέτρων που αφορούν την βλάστηση, την επιφάνεια του εδάφους και την μετεωρολογία. Οι σπουδαιότεροι παράμετροι στην χρησιμοποίηση δορυφορικών δεδομένων είναι οι Δείκτες Βλάστησης.

**5.4.4.1 Χρήση δεικτών βλάστησης – στιγμιαία εκτίμηση.**  
Πολλές εργασίες ασχολήθηκαν και αποκάλυψαν την ύπαρξη σχέσεων ( άλλοτε δυνατών άλλοτε ασθενέστερων ) μεταξύ του NDVI και των παραμέτρων σκιαζόμενου πεδίου όπως ο L.A.I. ή η αέρια βιομάζα. Όλες αυτές οι εργασίες προσπάθησαν να εγκαθιδρύσουν στατιστικές σχέσεις μεταξύ του NDVI και του L.A.I καθώς και μεταξύ του αθροίσματος του NDVI και της βιομάζας.

Ο Sellers το 1985 παρουσίασε, χρησιμοποιώντας ένα μοντέλο για την μεταφορά ακτινοβολίας, το συμπέρασμα ότι ο NDVI αποκτά ευαισθησία στην εκτίμηση του L.A.I και/ή της βιομάζας όταν:

- ο L.A.I γίνεται μεγαλύτερος από τις τιμές 2 ή 3
- το έδαφος έχει δυνατή επίδραση στην ραδιομετρική αντίδραση της επιφάνειας παρατήρησης ( αδύναμος L.A.I )
- υπάρχει μεγάλη ποσότητα νεκρής φυτικής ύλης στην σκιαζόμενη επιφάνεια
- η αρχιτεκτονική δομή του φύλλου είναι άγνωστη και η ηλιακή ζενίθεια γωνία είναι κοντά στην χαμηλότερη τιμή της.

Όταν κάποιος δεν ασχολείται με τις παραμέτρους του πεδίου αλλά με τις αναλογίες ( PARa ) ή με διαδικασίες όπως η διαφυγή υγρασίας και η φωτοσύνθεση, ο κορεσμός των φαινομένων αυτών πραγματοποιείται με πιο αργό ρυθμό και μπορεί να αντιμετωπισθεί με περισσότερες πιθανότητες χρήσης.

Ο PARa είναι το αποτέλεσμα της ισορροπίας μεταξύ της προσπιπτούμενης ακτινοβολίας και της ανάκλασης της από την βλάστηση, το έδαφος ή της μεταβίβασης της από την βλάστηση. Για τις δορυφορικές μετρήσεις μόνο το κομμάτι που αφορά ολόκληρη την ανάκλαση από σκιαζόμενη επιφάνεια, έχει μετρηθεί. Για την αποφυγή αυτού του περιορισμού

δοκιμάστηκαν πολλοί συνδυασμοί πληροφοριών οι οποίες πάρθηκαν από διάφορες περιοχές του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος. Όσο περισσότερο αυξάνεται η σκιαζόμενη επιφάνεια τόσο περισσότερο αυξάνεται η απορρόφηση στο ερυθρό μήκος κύματος και τόσο περισσότερο αυξάνει η ποσότητα της ακτινοβολίας που ανακλάται κοντά στο υπέρυθρο μήκος κύματος. Το παραπάνω φανερώνει για άλλη μια φορά την σημασία την οποία έχουν δείκτες όπως ο NDVI.

Σε θεωρητική μελέτη οι Asrar, Sellers έδειξαν ότι οι σχέσεις των NIR/PARa ή Vis/PARa είναι εξαρτώμενοι από τις συνθήκες της γωνίας παρατήρησης, της ηλιακής ζενίθειας γωνίας και του μέσου προσανατολισμού των φύλλων. Όταν τα <<κανάλια>> συνδυασθούν στον τύπο του NDVI η σχέση λαμβάνεται σχεδόν ως γραμμική και η εξάρτηση της από τις παραμέτρους που αναφέρθηκαν παραπάνω είναι σαφώς μικρότερη.

Πειραματικά η γραμμικότητα αυτή έχει επίσης παρατηρηθεί από διάφορους ερευνητές. Κάποιος μπορεί εύκολα να παρατηρήσει στο σχήμα 5.23 ότι υπάρχει κάποια διάχυση, διασκόρπιση των σημείων γύρω από την ευθεία γραμμή. Αυτό μπορεί να είναι το αποτέλεσμα των αλλαγών των ατμοσφαιρικών συνθηκών και της ηλιακής ζενίθειας γωνίας.

Η επίδραση των ξηρών τεμαχίων στη σκιαζόμενη επιφάνεια επίσης παίζει κάποιο ρόλο στην διασκόρπιση των σημείων. Αν το φύλλο ξηραθεί η απορρόφηση της ακτινοβολίας μειώνεται άρα με την σειρά του μειώνεται και ο δείκτης βλάστησης. Η ταυτόσημη φωτοσυνθετική δράση στην επιφάνεια και η εκτίμηση του NDVI εξαρτώνται από το ποσά νεκρά σωματίδια περιέχονται στην σκιαζόμενη επιφάνεια. Στην δορυφορική μέτρηση η επίδραση των νεκρών σωματιύων είναι μπερδεμένη με άλλες διαταραχές όπως για παράδειγμα η επίδραση από τις διαταραχές του εδάφους. Η επίδραση των ξηρών σωματιύων δεν διορθώθηκε μέχρι σήμερα και είναι αμφίβολο αν θα αντιμετωπισθεί χωρίς την κατανόηση κάποιων στοιχείων όπως ο τύπος της βλάστησης και ο τύπος του εδάφους.

Όταν ο NDVI έχει χαμηλή τιμή η διασκόρπιση των σημείων γίνεται μεγαλύτερη και αυτό οφείλεται στην επίδραση της ανάκλασης από το έδαφος. Παρά τις αποκλίσεις αυτές ο Asrar υπολόγισε ότι αυτή η μέθοδος επιτρέπει μια εκτίμηση του PARa με περιθώριο λάθους 10%.

**5.4.4.2 Χρήση δεικτών βλάστησης – χρονικές σειρές.** Πολλές ραδιομετρικές μετρήσεις, οι οποίες πραγματοποιήθηκαν είτε στο εργαστήριο είτε στον αγρό έδειξαν ότι σχεδόν κάθε φυτικό είδος έχει μια συγκεκριμένη ραδιομετρική αντίδραση σε διαφορετικά μήκη κύματος. Αυτή η εξειδίκευση έχει καθορισθεί υπό την <<σφραγίδα>> του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος. Δυστυχώς όμως στις σημερινές επιχειρησιακές μεθόδους της τηλεπισκόπησης αυτή η θεωρητική πιθανότητα φυτικής αναγνώρισης δεν είναι εφικτή. Για κάθε στοιχείο η τιμή της ακτινοβολίας η οποία καταγράφεται είναι μια τιμή που ενσωματώνει όλα τα στοιχεία που υπάρχουν στην επιφάνεια συμπεριλαμβανόμενου και του εδάφους η διαταραχή του οποίου περνά στην ατμόσφαιρα.

Πολλοί ερευνητές προσπάθησαν να συνδέσουν τον χρόνο αλλαγής του NDVI και την εποχική αλλαγή της βλάστησης. Για αρκετές μεγάλες κλάσεις βλάστησης παρατηρήθηκαν δυνατές σχέσεις. Παρ'όλα αυτά σε διαφορετικούς τύπους βλάστησης παρατηρήθηκαν χρονικές αλλαγές των σημείων οι οποίες είναι δύσκολο να διακριθούν.

Άλλοι ερευνητές πρότειναν τυποποίηση της βλάστησης ανάλογα με τα δορυφορικά δεδομένα και χρησιμοποίησαν δυο κύριες διαδικασίες:

α) Η πρώτη περιλαμβάνει μια τυχαία τυποποίηση της βλάστησης με την δημιουργία μιας αυτόματης τυποποίησης του χρόνου αλλαγής των δεικτών βλάστησης. Αυτή η μέθοδος έχει το πλεονέκτημα ότι μπορεί να δημιουργήσει χάρτες για μελέτη σχεδόν σε πραγματικό χρόνο. Για κάποιες συγκεκριμένες ομάδες όμως οι χρονικές αλλαγές των σημείων, όπως ήδη αναφέρθηκε, είναι δύσκολο να διακριθούν.

Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιήθηκε στην πράξη στο πρόγραμμα MARS για να τυποποιήσει καλλιέργειες σε διαφορετικές τοποθεσίες με την βοήθεια στοιχείων από τον SPOT/HRV. Μετά από αυτόματη τυποποίηση των σημείων η δουλειά των φωτο-ερμηνευτών περιέχεται στην σύνδεση του τύπου της καλλιέργειας με την κάθε δημιουργία των ομάδων.

β) Η δεύτερη περιλαμβάνει μια ελεγχόμενη τυποποίηση των στοιχείων. Μερικά μεμονωμένα χαρακτηριστικά όπως το ετήσιο μέσο NDVI κ.α. μετρήθηκαν σε συγκεκριμένες γεωγραφικές περιοχές και για γνωστό τύπο βλάστησης. Κατόπιν οι μετρήσεις αυτές επεκτάθηκαν σε ολόκληρη την δορυφορική εικόνα αποδίδοντας τον ίδιο τύπο βλάστησης σε κάθε σημείο με τα ίδια χαρακτηριστικά.

Η μέθοδος αυτή υποφέρει από την ανάγκη για πολύ ακριβή γνώση της φύσης και της γεωγραφικής περιγραφής της βλάστησης σε μια συγκεκριμένη περιοχή. Επίσης μετά τον διασκορπισμό των σημείων ένας μικρός ή μεγάλος αριθμός στοιχείων δεν τυποποιήθηκαν ή τυποποιήθηκαν λανθασμένα.

#### **5.4.4.3 Δείκτης βλάστησης κανονικοποιημένης διαφοράς (NDVI).**

Με την πραγματική κατάσταση της τεχνολογίας, για την παρακολούθηση της βλάστησης μπορούν να χρησιμοποιηθούν δύο είδη δορυφορικών δεδομένων: εικόνες υψηλής διακριτικής ικανότητας με χαμηλή συχνότητα επανάληψης όπως οι SPOT και Landsat και εικόνες χαμηλής διακριτικής ικανότητας με υψηλή συχνότητα επανάληψης, όπως το AVHRR.

Χρησιμοποιώντας εικόνες SPOT και Landsat λαμβάνεται κυρίως ποιοτική πληροφορία. Μπορούν να είναι συμπληρωματικές σε άλλες πηγές με περισσότερο ακριβείς πληροφορίες. Οι εικόνες AVHRR είναι πολύ χρήσιμες, ιδίως όταν οι επιφανειακοί μετεωρολογικοί σταθμοί είναι σπάνιοι. Διακυμάνσεις από χρονιά σε χρονιά μπορούν να καταγραφούν σε μεγάλες περιοχές, οι οποίες θα ήταν αδύνατο να καταγραφούν με άλλα μέσα.

Μια από τις σημαντικότερες αναπτύξεις του Landsat Πολυφασματικού Σαρωτή (MSS: Multispectral Scanner) ήταν η χρήση του ορατού και του κοντινού υπέρυθρου, κανάλια 5 και 7, για την παρακολούθηση της υγείας και της ανάπτυξης της βλάστησης και των καλλιεργειών (Yates et al., 1984). Το ορατό και το κοντινό υπέρυθρο κανάλι του AVHRR, τα κανάλια 1 και 2, έχουν φασματική απόκριση παρόμοια με τις μπάντες 5 και 7 του MSS. Το πλεονέκτημα των δορυφόρων NOAA για την παρακολούθηση πράσινης βλάστησης είναι ότι παρέχουν ημερήσια παρατήρηση ενώ ο Landsat έχει ένα χρόνο επανάληψης της τάξης των 18 ημερών.

Διάφοροι μαθηματικοί συνδυασμοί των καναλιών 1 και 2 έχουν βρεθεί για να είναι ευαίσθητοι δείκτες στην ύπαρξη πράσινης βλάστησης. Υπάρχουν πολυάριθμοι άλλοι δείκτες που έχουν προταθεί και μπορούν να χρησιμοποιηθούν στη θέση του NDVI. Δύο δείκτες βλάστησης υπολογίζονται



συνήθως από τα κανάλια 1 και 2 του AVHRR. Ένας απλός δείκτης VI και ο κανονικοποιημένος δείκτης βλάστησης NDVI, που ορίζονται ως εξής:

$$VI = CH_2 - CH_1 \quad (5-64)$$

$$NDVI = \frac{CH_2 - CH_1}{CH_2 + CH_1} \quad (5-65)$$

όπου  $CH_1$  και  $CH_2$  είναι οι μετρήσεις των καναλιών 1 και 2. Ο κανονικοποιημένος δείκτης NDVI προτιμάται για ολική φυτική παρακολούθηση διότι μερικά αντισταθμίζει τις αλλαγές των συνθηκών φωτισμού, την κλίση του εδάφους και τον προσανατολισμό θέασης. Επίσης τα νέφη, το νερό και το χιόνι έχουν μεγαλύτερη ανακλαστικότητα στο ορατό παρά στο κοντινό υπέρυθρο και έτσι αυτές οι περιοχές έχουν NDVI αρνητικό. Το γυμνό και βραχώδες έδαφος δίνουν τιμές δείκτη βλάστησης κοντά στο μηδέν. Οι ατμοσφαιρικές επιδράσεις μειώνουν το δείκτη βλάστησης.

Μέτρο του βαθμού απορρόφησης από τη χλωροφύλλη σε μήκη κύματος του ερυθρού στο ηλεκτρομαγνητικό φάσμα αποτελεί ο δείκτης βλάστησης, NDVI (Normalized Difference Vegetation Index). Ο δείκτης αυτός εκτιμάται από δορυφορικά δεδομένα, τα οποία, στην πλειοψηφία των επιστημονικών μελετών μέχρι σήμερα, προέρχονται από τη σειρά των μετεωρολογικών δορυφόρων πολικής τροχιάς NOAA/AVHRR, που διαθέτουν ακτινόμετρα μεγάλης ευκρίνειας (AVHRR: Advanced Very High Resolution Radiometer), διακριτική ικανότητα  $1 \times 1 \text{ Km}^2$  περίπου και πέντε ζώνες φασματικών συχνοτήτων ορατού και υπέρυθρου. Ο παραπάνω δείκτης εξάγεται και από δορυφορικά δεδομένα του περιβαλλοντικού δορυφόρου LANDSAT, που διαθέτει περισσότερα φασματικά κανάλια και μεγαλύτερη διακριτική ικανότητα που φθάνει τα  $30 \times 30 \text{ m}$ , αλλά προσφέρει πολύ μικρή συχνότητα λήψης και καταγραφής παρατηρήσεων, καθώς και του SPOT.

Δεδομένου ότι η χλωροφύλλη απορροφά ακτινοβολία στο εύρος 0.62 έως 0.7  $\mu\text{m}$  και η πράσινη επιφάνεια των φύλλων ανακλά ακτινοβολία στα μήκη από 0.74 έως 1.1  $\mu\text{m}$ , ο NDVI, μπορεί να ειπωθεί, ότι είναι αξιόπιστος δείκτης της πυκνότητας της χλωροφύλλης στο φύλλο καθώς και του ποσοστού πυκνότητας φυλλικής επιφάνειας στο έδαφος. Κατ' επέκταση, αποτελεί αξιόπιστο μέτρο εκτίμησης ξηρής φυτικής ουσίας (βιομάζας) σε εκτάσεις με φυτοκάλυψη διαφόρου είδους.

Από όλα τα παραπάνω γίνεται σαφές, ότι ο NDVI αποτελεί ένα δείκτη άρρηκτα συνδεδεμένο με την αύξηση και την ανάπτυξη των φυτών και πρακτικά εφαρμόσιμο μέσο της σύγχρονης τεχνολογίας για την παρακολούθηση της επίγειας βλάστησης από το διάστημα. Η διαχρονική αύξηση της τιμής του σε μελέτες και αναλύσεις χρονοσειρών αντικατοπτρίζει την αύξηση των βιοχημικών και φυσιολογικών ρυθμών ανάπτυξης των φυτών, όπως έντονη βλαστική και αναπαραγωγική ανάπτυξη (ανθοφορία, καρποφορία) λόγω έντονης φωτοσυνθετικής δραστηριότητας, καθώς και ικανοποιητική συσχέτιση με τελική παραγωγή βιομάζας στο τέλος μιας βλαστικής ή καλλιεργητικής περιόδου.

Αντίθετα, βαθμιαία πτώση στις τιμές του NDVI υποδηλώνει καταπόνηση (stress) από έλλειψη νερού ή υπερβολικά υψηλές για την εποχή



ή για τα φυτά θερμοκρασίες, σοκ τα οποία οδηγούν σε μείωση του ρυθμού φωτοσύνθεσης και, τελικά, σε ποιοτική και ποσοτική υποβάθμισή τους (καταπόνηση → μάρανση → ξήρανση → θάνατος). Τέτοιου είδους διεργασίες είναι είτε φυσιολογικές για ένα φυτικό είδος ή βιότυπο ως τμήμα βιολογικών κύκλων ή ενδογενών ρυθμών ανάπτυξης που διαθέτει το φυτό αυτό καθαυτό ή τυχαίες ανωμαλίες, άλλοτε αντιστρεπτές και άλλοτε όχι.

Οι τιμές του NDVI κυμαίνονται θεωρητικά από  $-1$  έως  $+1$ , όπως εξάγεται από τη μαθηματική εξίσωση που προαναφέρθηκε. Τιμές άνω του μηδενός υποδηλώνουν ύπαρξη πράσινης βλάστησης (χλωροφύλλης) ή γυμνού εδάφους (τιμές γύρω στο μηδέν), ενώ κάτω του μηδενός δηλώνουν ύπαρξη νερού, χιονιού, πάγου και νεφών. Ενδεικτικές τιμές για κάθε ένα από τους παραπάνω τύπους φαίνονται στον πίνακα 5.4.

Τέλος, τονίζεται ότι ο δείκτης βλάστησης αποτυγχάνει να εκτιμήσει βλάστηση, όταν ο δείκτης LAI (Leaf Area Index, δείκτης φυλλικής επιφάνειας), που είναι μέτρο του ποσοστού της κάλυψης του εδάφους με φύλλωμα, έχει ιδιαίτερα χαμηλές τιμές. Έτσι, όταν η φυτική βλάστηση καλύπτει κάτω από το 20% του εδάφους, η τιμή του NDVI αντικατοπτρίζει τιμές γυμνού εδάφους και άλλων εδαφικών συσσωματωμάτων στην επιφάνεια. Γι' αυτό το λόγο η εκτίμηση βλάστησης σε ξηροφυτικές περιοχές γίνεται αρκετά επισφαλής.

**Πίνακας 5.4** Ενδεικτικές τιμές δείκτη βλάστησης σε διάφορες μορφές κάλυψης εδάφους

ΤΥΠΟΣ ΕΔΑΦΟΚΑΛΥΨΗΣ	NDVI (σε κλίμακα $-1, 1$ )	NDVI (σε κλίμακα 0-255)
Πυκνή βλάστηση	$0.500 \leq \text{NDVI} \leq 1$	$210 \leq \text{NDVI} \leq 255$
Μέτρια πράσινη βλάστηση	$0.140 \leq \text{NDVI} < 0.500$	$118 \leq \text{NDVI} < 210$
Αραιή βλάστηση	$0.090 \leq \text{NDVI} < 0.140$	$105 \leq \text{NDVI} < 118$
Γυμνό έδαφος (οργωμένο ή βραχώδες)	$0.025 \leq \text{NDVI} < 0.090$	$88 \leq \text{NDVI} < 105$
Νέφη	$0.002 \leq \text{NDVI} < 0.025$	$83 \leq \text{NDVI} < 88$
Χιόνι και πάγος	$-0.046 \leq \text{NDVI} < 0.002$	$70 \leq \text{NDVI} < 83$
Νερό	$-1 \leq \text{NDVI} < -0.046$	$0 \leq \text{NDVI} < 70$

Εμπειρικές μελέτες δείχνουν ότι υπάρχει σύνδεση μεταξύ της ανάπτυξης της βλάστησης και του επιπέδου των δεικτών βλάστησης (Barrett and Thompson, 1983). Υπάρχουν παρόλα αυτά όρια στις εφαρμογές του

NDVI, ειδικά όταν η βλάστηση δεν καλύπτει ολόκληρη την επιφάνεια και όταν η απόκριση του εδάφους είναι σημαντική. Στην περίπτωση υψηλής απόδοσης βλάστησης υπάρχει επίσης και κορεσμός του NDVI.

Περισσότερο βασικές μέθοδοι συνδέουν τον NDVI με τον Δείκτη Φυλλικής Επιφάνειας (LAI) ή με το συντελεστή παρεμπόδισης του φωτός (Tucker, 1979).

Οι τάσεις της τρέχουσας έρευνας είναι η χρήση των δορυφορικών δεδομένων με έναν τρόπο παρόμοιο με ένα φαινολογικό μοντέλο (Meyer-Roux and King, 1992). Το κύριο πρόβλημα για αυτή την εφαρμογή είναι ότι εικόνες φυτοκάλυψης με μεγάλη χρονική επαναληπτικότητα είναι δυνατές μόνο με χαμηλή διακριτική ικανότητα, και επίσης με τα δεδομένα του AVHRR είναι δύσκολο να πάρουμε εικόνες στο σωστό φαινολογικό στάδιο εξαιτίας των νεφών. Οι Goward et al. (1991) συνόψισαν τις αποκλίσεις του NDVI που προκαλούνται από βαθμονομήσεις, από την ατμόσφαιρα και από θεάσεις μακριά από το ναδίρ.

Υπάρχουν σφάλματα στις παρατηρούμενες αλλαγές του δείκτη βλάστησης εξαιτίας του γεγονότος ότι δεν υπάρχει διόρθωση για τις διακυμάνσεις της τροχιάς των δορυφόρων για τη ζενίθια ηλιακή γωνία καθώς και τη γωνία θέασης του ήλιου. Το πρόβλημα έχει διαπιστωθεί στον υπολογισμό του δείκτη NDVI με τη χρήση του NOAA/AVHRR και σαν συνέπεια αυτού έχει αναπτυχθεί η τεχνική MCVI (maximum-value-composite-image, Holben, 1986).

Αυτή η τεχνική έχει να κάνει με την εκλογή των μέγιστων τιμών του δείκτη βλάστησης από ένα μεγάλο αριθμό παρατηρήσεων και βασίζεται στο γεγονός ότι γενικά ο NDVI παίρνει μέγιστες τιμές σε μεγάλα ύψη ήλιου και μικρές γωνίες θέασης του δορυφόρου. Ο Singh (1988) ανέπτυξε μια τεχνική για διόρθωση του NDVI από τις διακυμάνσεις της ζενίθιας γωνίας. Αυτή η τεχνική μπορεί να χρησιμοποιηθεί μόνο για γωνίες θέασης του δορυφόρου κοντά στο ναδίρ. Τα αποτελέσματα του Singh προτείνουν ότι ο NDVI μειώνεται όταν η ζενίθια γωνία του ήλιου αυξάνει. Αυτό είναι αντίθετο με τα αποτελέσματα των παρατηρήσεων των Deering and Eck (1987). Έτσι, θα πρέπει κάποιος να είναι προσεκτικός στις διορθώσεις εξαιτίας της γωνίας του ήλιου χωρίς να θεωρεί την ανισοτροπία της επιφάνειας. Οι Taylor et al (1985) ανέπτυξαν έναν εμπειρικό τρόπο διόρθωσης για μια περιοχή της Νέας Ζηλανδίας χρησιμοποιώντας καθημερινές παρατηρήσεις και έναν αλγόριθμο για τα νέφη.

Μεγάλη προσπάθεια έχει επενδυθεί στη μοντελοποίηση των επιδράσεων της ατμόσφαιρας σε στενές μπάντες ακτινοβολίας. Για παράδειγμα, αλλαγή στη γωνία του ήλιου οδηγεί σε αλλαγή της πορείας της ακτινοβολίας εξαιτίας της ατμοσφαιρικής σκέδασης και απορρόφησης και έτσι έχει επίδραση στις τιμές του NDVI στο επίπεδο του εδάφους. Μερικές διορθώσεις, όπως η διόρθωση για τη σκέδαση Rabeigle, μπορούν να αναπτυχθούν χωρίς σημαντικές δυσκολίες και μπορούν να βελτιώσουν την παραγωγή του NDVI. Παρόλα αυτά, ο υπολογιστικός φόρτος και οι άγνωστες ατμοσφαιρικές παράμετροι, ειδικά τα αερολύματα, εμποδίζουν την αποτελεσματική χρήση αυτής της διαδικασίας για παγκόσμια δεδομένα.

Οι Paltridge and Mitchell (1990) ανέπτυξαν έναν αλγόριθμο για τον γρήγορο υπολογισμό για τις ανακλάσεις δύο κατευθύνσεων του ορατού και του κοντινού υπέρυθρου. Αυτή η μέθοδος αφαιρεί την επίδραση της ατμόσφαιρας και είναι ακριβής για μικρό ποσοστό για γωνίες θέασης

μικρότερες των 40°. Συμπεραίνεται ότι μια μέτρηση της ανακλαστικότητας στο ορατό στο επίπεδο του εδάφους είναι δυναμικά πιο ακριβής μέτρηση για το περιεχόμενο σε υγρασία (fuel-moisture content FMC) από τη συνδυασμένοι μέτρηση της ανακλαστικότητας στο ορατό και το κοντινό υπέρυθρο ακτινοβολίας δύο κατευθύνσεων όπως είναι ο NDVI. Επιπρόσθετα ένα αριθμητικό μοντέλο της σκιάς των φυτών αναπτύχθηκε για να κανονικοποιεί τις ανακλαστικότητες που φθάνουν στο AVHRR.

Η αναγκαιότητα των ατμοσφαιρικών διορθώσεων υπαγορεύεται όχι μόνο από τη διαφορετική γεωμετρία των παρατηρήσεων αλλά επίσης από την παγκόσμια και εποχική κατανομή των υδρατμών και των άλλων ατμοσφαιρικών συστατικών. Μια δυναμική λύση για το πρόβλημα της επίδρασης των υδρατμών είναι η συνδυασμένη χρήση των AVHRR θερμικών καναλιών. Χρησιμοποιήθηκαν από τον Gutman (1991) τα ημερήσια δεδομένα των νεφών πάνω από το Κάνσας για ένα μήνα για να αναπτυχθεί μια διόρθωση της γωνίας θέασης για το παρατηρούμενο εύρος των γωνιών του ήλιου και για τον συγκεκριμένο τύπο επιφάνειας.

Αυτό το παράδειγμα υποδηλώνει ότι η διακύμανση στους υπολογιζόμενους δείκτες βλάστησης μπορεί να μειωθεί και έτσι να αυξηθεί το επίπεδο εμπιστοσύνης στη στατιστική σύγκριση των παρατηρήσεων διαφορετικών ετών. Η διόρθωση που αναπτύχθηκε εφαρμόστηκε για μια διαφορετική περιοχή και παρουσιάστηκε βελτίωση στα αποτελέσματά της. Η ευαισθησία των καναλιών του AVHRR υποβιβάζεται σημαντικά με το χρόνο μέχρι τη βαθμονόμηση (Teillet et al, 1990). Ο ρυθμός της αλλαγής μπορεί να είναι διαφορετικός για κάθε κανάλι. Αυτό μπορεί να προκαλεί συστηματικά σφάλματα στον NDVI. Οι Che and Price (1992) πρότειναν έναν NDVI που προκαλείται από τα σφάλματα βαθμονόμησης σαν συνάρτηση του NDVI.

Οι Becker and Li (1990) όρισαν τους Θερμικούς Υπέρυθρους Φασματικούς Δείκτες (Thermal Infrared Spectral Indices, TISI) οι οποίοι είναι ανεξάρτητοι της επιφανειακής θερμοκρασίας και αποκτούνται εύκολα από τα δορυφορικά δεδομένα. Αυτοί οι δείκτες δίνουν τη δυνατότητα να εκτελέσεις φασματικές αναλύσεις στις θερμικές υπέρυθρες μπάντες τόσο εύκολα όσο και στις περιοχές του ορατού και του κοντινού υπέρυθρου φάσματος και επίσης μπορεί να γίνει πολυφασματική ανάλυση συνδυάζοντας τους NDVI και TISI.

Ο δείκτης TISI αποκτήθηκε από μετρήσεις του Θερμικού Υπέρυθρου Φασματικού Σαρωτή (Thermal Infrared Spectral Scanner) του αεροσκάφους NASA C-130 από τους Li and Becker (1990) και συγκρίθηκε με τον NDVI. Βρήκαν ότι ο TISI είναι πιο ευαίσθητος από τον NDVI στα χαρακτηριστικά του γυμνού εδάφους ενώ ο NDVI είναι με τη σειρά του πιο ευαίσθητος στη βλάστηση και στη φυτοκάλυψη. Από αυτές τις αναλύσεις προκύπτει ότι οι NDVI και TISI είναι συμπληρωματικοί και η συνδυασμένη χρήση αυτών των δεικτών μπορεί να αυξήσει την ακρίβεια των αποτελεσμάτων από τη χρήση μόνο του NDVI.

Η έλλειψη προσοχής στη βαθμονόμηση των αισθητήρων, στις επιδράσεις της γωνίας θέασης και της ατμόσφαιρας τα οποία είναι θέματα έρευνας με αισθητήρες AVHRR, Landsat κλπ, δεν είναι πια δεκτή επειδή η χρήση των παρατηρήσεων έχει γίνει πιο απαιτητική από ότι είχε προβλεφθεί. Σε μια νέα γενιά αισθητήρων παρατήρησης της γης που θα αναπτυχθεί στον 21<sup>ο</sup> αιώνα, αυτές οι μελέτες πρέπει να είναι καθοριστικές για τον τρόπο κατασκευής των νέων αισθητήρων, την ανάπτυξη των νέων συστημάτων επεξεργασίας δεδομένων και των πρωτοβουλιών έρευνας.

### 5.4.5 Χρήση δεδομένων από τον METEOSAT, μοντέλο του Dedieu

Απευθείας μετρήσεις της παγκόσμιας ακτινοβολίας έχουν γίνει με τα πυρόμετρα. Είναι όμως γεγονός αναμφισβήτητο ότι το δίκτυο των μετρήσεων έχει επεκταθεί πάρα πολύ. Επίσης οι μηχανισμοί αυτοί σπάνια τυποποιούνται πράγμα που σημαίνει ότι οι μετρήσεις αυτές είναι δύσκολα συγκρίσιμες.

Για την επίλυση αυτών των προβλημάτων ο Dedieu πρότεινε μια μέθοδο η οποία εκτιμά την παγκόσμια ακτινοβολία που προσπίπτει στην επιφάνεια του εδάφους με την χρησιμοποίηση δεδομένων από τον γεωστατικό δορυφόρο METEOSAT.

Σε πρώτη φάση υπολογίσθηκε η προσπίπτουσα παγκόσμια ακτινοβολία στην κορυφή της ατμόσφαιρας χρησιμοποιώντας έναν τύπο ο οποίος λαμβάνει υπόψη την ηλιακή ζενίθεια γωνία και την απόσταση της γης από τον ήλιο. Κατόπιν αφαιρέθηκε η ποσότητα της ανακλώμενης ενέργειας η οποία μετρήθηκε από τον δορυφόρο. Τέλος η τιμές διορθώθηκαν για τις επιδράσεις της ατμοσφαιρικής μετάδοσης και του albedo της επιφάνειας. Το albedo προσδιορίστηκε από δορυφορικά δεδομένα. Η τελική εξίσωση που χρησιμοποιήθηκε είναι της μορφής:

$$R_{g_0} = I_0 d^{-2} \cos(\theta_s) T(\theta_s) (1-A) / (1-A_s) \quad (5-66)$$

Όπου  $R_{g_0}$  = παγκόσμια ακτινοβολία που προσπίπτει στην επιφάνεια του εδάφους

$I_0$  = ηλιακή σταθερά

$d$  = απόσταση της γης από τον ήλιο

$\theta_s$  = ηλιακή ζενίθεια γωνία

$T(\theta_s)$  = παράγοντας μετάδοσης σε συνθήκες καθαρού ουρανού, ο οποίος λαμβάνει υπόψη την απορρόφηση αερίων καθώς και την διάχυση των Mie και Rayleigh.

$A$  = πλανητικό albedo το οποίο λαμβάνεται από δορυφορικές μετρήσεις

$A_s$  = albedo της επιφάνειας, υπολογίζεται ότι είναι ίσο με την χαμηλότερη τιμή του albedo που έχει ληφθεί από τον δορυφόρο για μια περίοδο επαρκώς μεγάλη για την πιθανότητα να υπάρχει μια συννεφιασμένη ημέρα.

### 5.4.6 Τρόποι χρήσης δορυφορικών δεδομένων στα μοντέλα πρόγνωσης

Σε αυτό το σημείο θα πρέπει να αναφερθεί και πάλι ότι τα δορυφορικά δεδομένα μπορούν να χρησιμοποιηθούν απ'ευθείας στη βάση και τον τύπο των στατιστικών σχέσεων με τιμές εκτίμησης. Η σημασία και η ακρίβεια αυτής της μεθόδου όμως μπορεί να αμφισβητηθεί έντονα.

Από την άλλη πλευρά θα εξετασθούν διαφορετικές μέθοδοι αντιμετώπισης της χρήσης δορυφορικών δεδομένων στα μοντέλα παραγωγής, τα οποία περιγράφηκαν σχετικά πρόσφατα από τον Delecolle.



Σύμφωνα με αυτά ο δημιουργός του μοντέλου έχει κατά βάση να ακολουθήσει δυο στρατηγικές:

**1) Δυναμικές μεθόδους ( Forcing methods ).** Σε αυτήν την περίπτωση ο δημιουργός του μοντέλου αποφασίζει να χρησιμοποιήσει τα δορυφορικά δεδομένα ( ή την μετατροπή τους σε ένα πεδίο μεταβλητών ) σαν δυναμική του μοντέλου σε κάθε χρονικό βήμα (σχήμα 5.17). Η περίπτωση αυτή, όπως άλλωστε φαίνεται από το σχήμα 5.17, είναι μια τυπική περίπτωση εκτίμησης παραγωγής με την βοήθεια του μοντέλου αποδοτικότητας του Monteith. Για παράδειγμα η αποδοτικότητα της παρεμπόδισης της ηλιακής ακτινοβολίας έχει προέλθει για κάθε χρονικό βήμα από τις εκτιμήσεις του NDVI.

**2) Μέθοδοι αναπροσαρμογής ( Readjustment methods ).** Σε αυτήν την δεύτερη περίπτωση ο δημιουργός του μοντέλου προσπαθεί να ελέγξει κατά πόσο το πεδίο των εκτιμώμενων μεταβλητών, χρησιμοποιώντας δεδομένα δορυφόρων, είναι ποσοτικώς παρόμοιο με το πεδίο μεταβλητών που προσομοιώθηκε με το μοντέλο παραγωγής. Εάν αυτό πραγματικά συμβαίνει ο ερευνητής συμπεραίνει ότι το μοντέλο δούλεψε σωστά και τα δορυφορικά δεδομένα επιτρέπουν μια διαστημική επέκταση του μοντέλου.

Στην περίπτωση που υπάρχει μια υπολογίσιμη απόκλιση μεταξύ δυο εκτιμήσεων ο ερευνητής αποφασίζει να αναπροσαρμόσει το μοντέλο. Και πάλι όμως όπως και προηγούμενα ο δημιουργός του μοντέλου έχει κατά βάση να ακολουθήσει δυο στρατηγικές :

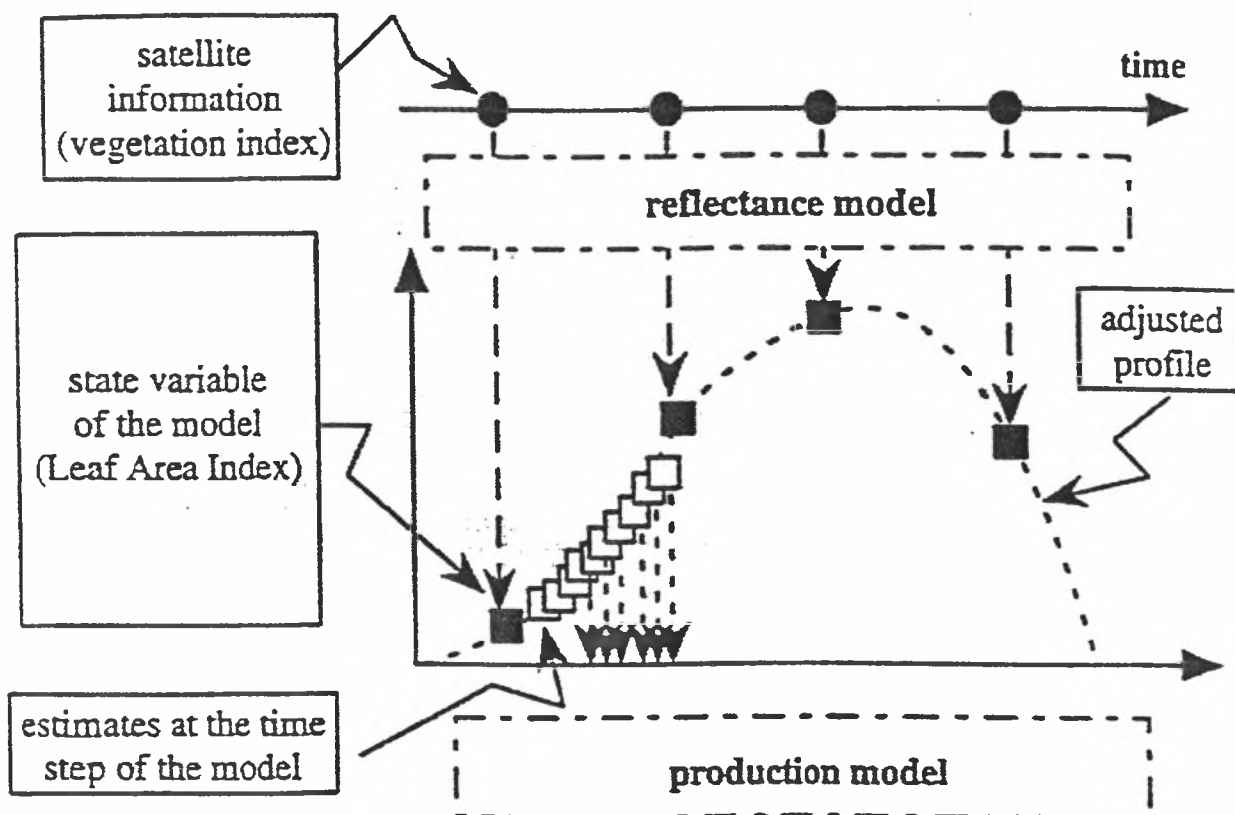
- είτε θα αποφασίσει να επανατυποποιήσει το πεδίο των μεταβλητών του για κάθε χρονικό βήμα των υπολογισμών του,
- είτε θα αποφασίσει να διορθώσει την τιμή της εκτιμώμενης παραγωγής μόνο μια φορά στο τέλος της προσομοίωσης.

**2α) Μέθοδοι επανατυποποίησης ( Recalibration methods ).** Στην περίπτωση αυτή ο ερευνητής κάνει μια υπόθεση, υποθέτει δηλαδή ότι οι ραδιομετρικές πληροφορίες δίνουν μια ακριβή σχέση – αναφορά και ότι το μοντέλο παρ'όλο που μοντελοποιήθηκε σωστά, τυποποιήθηκε άσχημα.

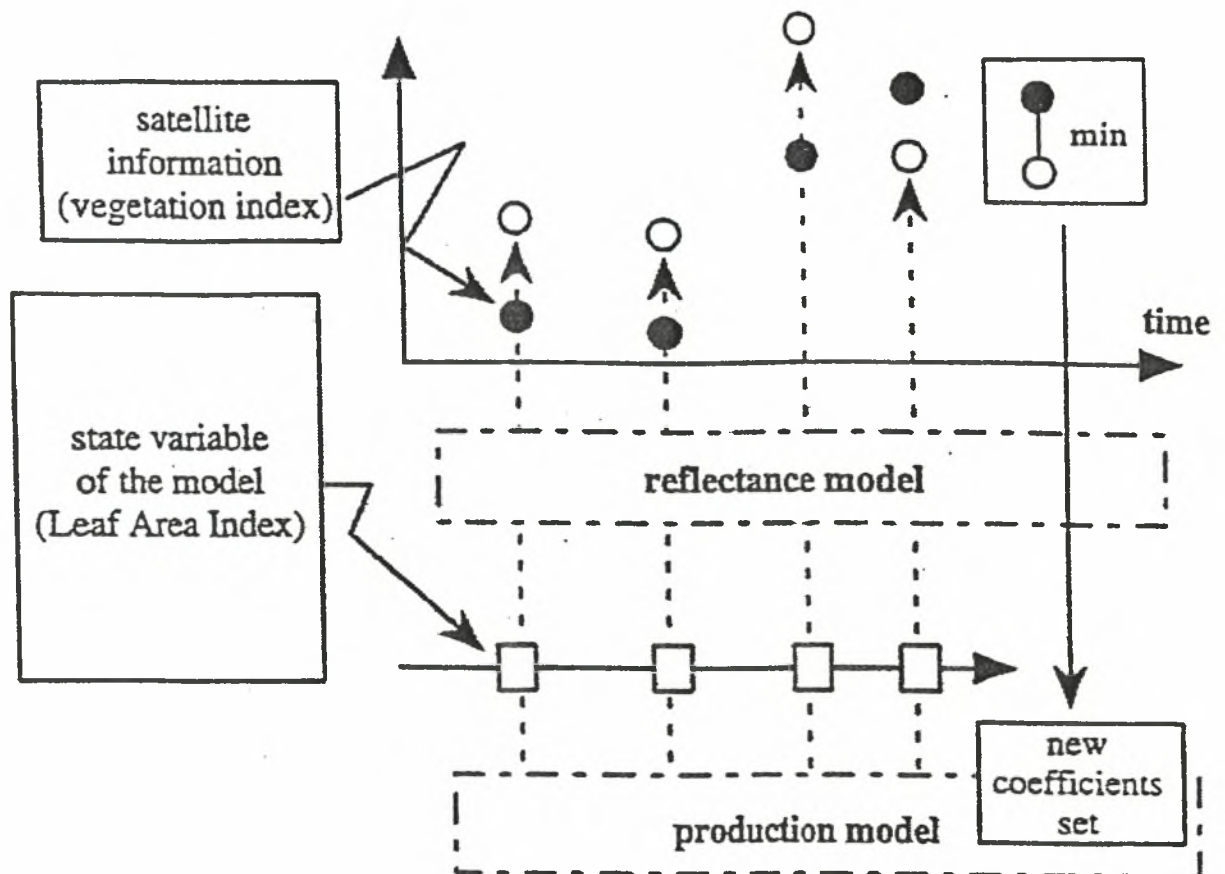
Σε κάθε χρονικό βήμα, όταν οι μεταβλητές που εκτιμήθηκαν με το μοντέλο διαφέρουν από την ραδιομετρική εκτίμηση, ο ερευνητής πρέπει να επαναυπολογίσει νέες τιμές παραμέτρων οι οποίες πρέπει να πλησιάζουν, όσο είναι αυτό εφικτό, τις ραδιομετρικές τιμές. (σχήμα 5.18).

Ένα παράδειγμα για τα παραπάνω έχει δοθεί με την δουλεία των Moulin και Fischer το 1993. Οι ερευνητές αυτοί χρησιμοποίησαν ένα μοντέλο το AFCRWHEAT. Το μοντέλο αυτό μπορεί να δημιουργήσει μια LAI εκτίμηση σε κάθε χρονικό βήμα. Συγκροτώντας τις τιμές αυτές στο μοντέλο μεταφοράς ακτινοβολίας SAIL ( Scattering by Arbitrarily Inclined Leaves ) μπορεί κάποιος να αντλήσει τιμές αντανάκλασης στο ερυθρό και κοντά στο υπέρυθρο αντίστοιχα. Αυτές οι τιμές αντανάκλασης κατόπιν συγκρίθηκαν με την πραγματική αντανάκλαση που μετρήθηκε από τον δορυφόρο.

Γενικά οι μαθηματικές μέθοδοι χρησιμοποιήθηκαν γι'αυτό που ονομάζεται μέθοδος ελαχιστοποίησης. Η απλοποίηση της μεθόδου μπορεί να ειπωθεί ότι οδηγεί στον υπολογισμό εμπειρικών συντελεστών με την χρήση πολλαπλών παλινδρομήσεων.



**Σχήμα 5.25** Διάγραμμα ενός δυναμικού μοντέλου παραγωγής με χρησιμοποίηση τιμών από τον δείκτη βλάστησης.



**Σχήμα 5.26**

Διάγραμμα της επανατυποποίησης ενός δυναμικού μοντέλου παραγωγής με χρησιμοποίηση τιμών από τον δείκτη βλάστησης.

**2β) Διορθωτικές μέθοδοι ( Correction methods ).** Σε αυτήν την δεύτερη περίπτωση τα ραδιομετρικά δεδομένα έχουν υπολογισθεί εξ΄ισου σαν ακριβείς τιμές. Ο ερευνητής λοιπόν παρακολουθεί μέσα στο χρόνο τις αποκλίσεις μεταξύ μιας ή περισσότερων μεταβλητών που προσομοιώθηκαν από το μοντέλο παραγωγής και τα αντίστοιχα δεδομένα τα οποία αντλήθηκαν από δορυφορικά δεδομένα. Στο τέλος της προσομοιώσεως η μέση απόκλιση που έχει ληφθεί χρησιμοποιείται για να εκτιμήσει έναν όρο ο οποίος θα διορθώσει την τελική προσομοιωμένη εκτίμηση παραγωγής (σχήμα 5.19).

Σε αντίθεση με την προηγούμενη μέθοδο ο ερευνητής δεν τυποποιεί τις τιμές των παραμέτρων του μοντέλου. Η ακρίβεια της πραγματοποιούμενης διόρθωσης εξαρτάται από την επιλογή των μεταβλητών οι οποίες θα εκτιμήσουν τον διορθωτικό όρο. Η παράμετρος που πρέπει να επιλέγει πρέπει να είναι όσο το δυνατόν πιο κοντά στην χρονική εξέλιξη της πρόγνωσης.

Η σωστή εφαρμογή της μεθόδου αυτής οφείλει να πραγματοποιήσει, να χρησιμοποιήσει και να επιλύσει, σημαντικές μαθηματικές σχέσεις λεπτομέρειες των οποίων μπορεί κάποιος να βρει στην ερευνητική δουλειά του Faivre.

#### 5.4.7 Παρακολούθηση καλλιεργειών-βιομάζας

Η βιομάζα/φυτομάζα ορίζεται ως το βάρος της ξηράς ουσίας των φυτών ανά μονάδα έκτασης. Είναι δυνατό να συσχετιστεί η φυτομάζα με άλλα χαρακτηριστικά μεγέθους των φυτών, όπως το ύψος και η διάμετρος του βλαστού σε ένα μοντέλο το οποίο έχει την παρακάτω μορφή :

$$P_{mass} = a + b d^2 H \quad (5-67)$$

$d$  = η διάμετρος του βλαστού σε ύψος 1,3 μέτρων και

$H$  = το ύψος του φυτού.

Εφαρμογή του μοντέλου σε κάποιο είδος μεσογειακών θάμνων δίνει την παρακάτω σχέση:

$$P_{mass} = 0.642 H^{0.0075} D_{max}^{2.4901} \quad (5-68)$$

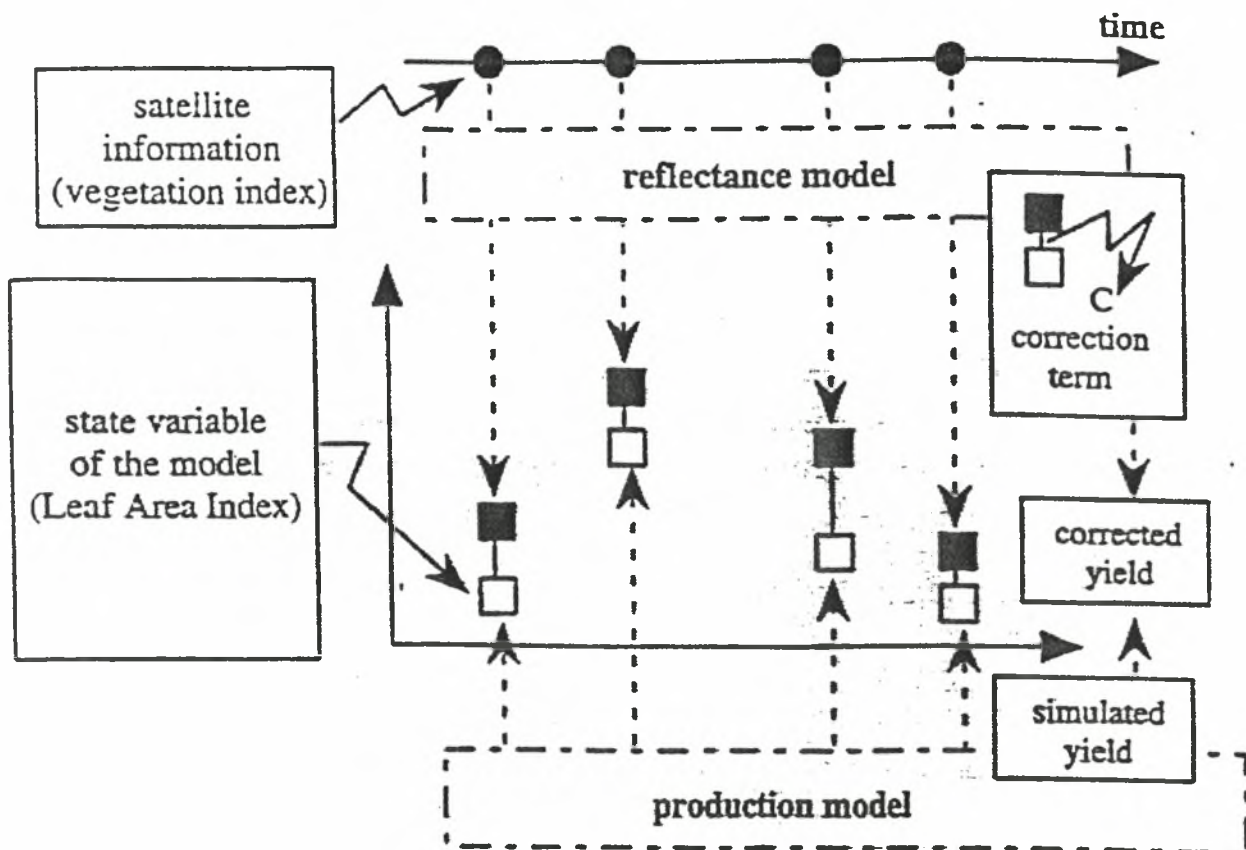
$H$  = το ύψος του φυτού σε μέτρα και

$D_{max}$  = η μέγιστη διάμετρός του, επίσης σε μέτρα.

Το μοντέλο περιέχει τόσο τα ενεργά όσο και τα νεκρά τμήματα του φυτού, καθώς και τα πράσινα και μη-πράσινα μέρη του. Για να μην ληφθούν αυτά υπόψη θα πρέπει να τροποποιηθεί το μοντέλο με τρόπο που να εξαρτάται από το είδος του υπό μελέτη φυτού, καθώς και την ηλικία του. Στο παράδειγμα των θάμνων, ο Τσιρούλης (1992) διαπίστωσε ότι η φυτομάζα των φύλλων αποτελεί το 17 % της συνολικής φυτομάζας, ενώ τα νεκρά τμήματα του φυτού αποτελούσαν το 11,2 % της συνολικής φυτομάζας.

Μελέτες έχουν αποδείξει ότι υπάρχει σχέση από την οποία μπορεί να υπολογιστεί η ξηρή βιομάζα από δορυφορικά δεδομένα. Μια τέτοια σχέση είναι (Συλλαίος 1990):





**Σχήμα 5.19** Διάγραμμα της διόρθωσης της τελικής τιμής παραγωγής η οποία προσομοιώθηκε από ένα δυναμικό μοντέλο παραγωγής, Σύμφωνα με την μέθοδο του Faivre.

$$\Xi\eta\rho\acute{\eta} \text{ Βιομάζα} = -327.7 + 429.2 \text{ (ch 10 / ch 8)}$$

(5-69)

όπου ch8 και ch10 είναι αντίστοιχα τα εύρη του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος 0.66-0.72  $\mu\text{m}$  και 0.8-1.0  $\mu\text{m}$ . Η ξηρή βιομάζα είναι δυνατό να οδηγήσει σε πρόγνωση παραγωγής, καθώς από στατιστικά δεδομένα προκύπτει ότι η ξηρή βιομάζα σε δεδομένη χρονική στιγμή και η τελική παραγωγή είναι ανάλογα.

Έχει αποδειχθεί σε μελέτες η άμεση σχέση του δείκτη NDVI με τη φυτομάζα των καλλιεργειών. Η ακριβής αναλογία που ισχύει μεταξύ των δύο αυτών μεγεθών εξαρτάται από το είδος του φυτού, την φυλλική του επιφάνεια (όσο μεγαλύτερη φυλλική επιφάνεια και εδαφοκάλυψη υπάρχει, τόσο μεγαλύτερες τιμές NDVI εκτιμώνται) και της ποσότητας της χλωροφύλλης στα φύλλα (Ζαρπας 1995; Fassnacht et al., 1994).

Αυτό και μόνο το συμπέρασμα έχει μεγάλη χρησιμότητα για τις καλλιέργειες οι οποίες καλλιεργούνται για την φυτική μάζα που παράγουν και όχι για τον καρπό τους (χορτοδοτικά φυτά). Χρησιμοποιώντας την παραπάνω σχέση και λαμβάνοντας υπ' όψη ότι στις περισσότερες καλλιέργειες, εύρωστα και υγιή φυτά έχουν αφ' ενός υψηλές τιμές NDVI λόγω της μεγάλης βλαστικής ανάπτυξης, και αφ' ετέρου μεγάλη απόδοση, είναι δυνατόν να εξαχθεί σχέση που να συνδέει τα δύο αυτά μεγέθη, τις τιμές NDVI και την απόδοση.

Είναι λοιπόν δυνατό να χρησιμοποιηθεί ο δείκτης βλάστησης για πρόγνωση παραγωγής από τη μέση του βλαστικού κύκλου της καλλιέργειας, χρησιμοποιώντας και δεδομένα από προηγούμενες χρονιές και συγκρίνοντας δεδομένα που προήλθαν από τις ίδιες καλλιέργειες, στις ίδιες περιοχές, την ίδια χρονική περίοδο. Για να εξαχθούν ακριβή συμπεράσματα, απαιτούνται λεπτομερή και ακριβή δεδομένα. Ακόμη και με μη ακριβή δεδομένα όμως, είναι δυνατό να υπάρχουν κάποιες εκτιμήσεις για το επίπεδο της τελικής παραγωγής.

Οι Steven *et al.* (1983), χρησιμοποίησαν το δείκτη βλάστησης και απέδειξαν την άμεση σχέση του με την φωτοσυνθετική δραστηριότητα των φυτών. Ο Monteith (1977) κατέληξε σε ένα μοντέλο από το οποίο προκύπτει πως η παραγωγή ξηρής βιομάζας ( $dW$ ) ανά μονάδα έκτασης ( $dt$ ) είναι ανάλογη με την φωτοσυνθετικά ενεργή ακτινοβολία ( $S$ ), το ποσοστό ( $f$ ) που απορροφάται από την καλλιέργεια και την «απόδοση» ( $n$ ) της μετατροπής της απορροφούμενης ενέργειας σε βιομάζα. Το μοντέλο έχει ως εξής:

$$dW/dt = n.f.S$$

(5-70)

Το  $S$  μπορεί να προκύψει από μετεωρολογικά δεδομένα. Η απόδοση  $n$  δεν υπολογίζεται εύκολα, αλλά έχει διαπιστωθεί ότι έχει μικρή διαφοροποίηση αν ληφθεί ως μέσος όρος καθ' όλη τη διάρκεια της βλαστικής περιόδου, με εξαίρεση την περίπτωση ύπαρξης καταπόνησης (stress) στην καλλιέργεια. Το  $f$  μπορεί να υπολογιστεί από εμπειρικούς τύπους. Με τη χρήση των δύο σχέσεων είναι δυνατόν να υπολογισθεί η παραγόμενη βιομάζα χρησιμοποιώντας το δείκτη βλάστησης, μέσο της φωτοσυνθετικής δραστηριότητας.

Οι Pereira *et al.* (1994) κατέληξαν σε μια άλλη σχέση η οποία συνδέει τον δείκτη βλάστησης NDVI (από δεδομένα LANDSAT) και την φυτομάζα  $P_{mass}$  (σε κιλά ανά τετραγωνικό μέτρο).

$$P_{mass} = -0.2088 + 2.0212 * (NDVI)^2 \quad (5-71)$$

Οι Gamon *et al.* (1995) μελέτησαν αρκετές γραμικές σχέσεις μεταξύ  $\ln(P_{mass})$  ή  $\ln(GP_{mass})$  (όπου  $GP_{mass}$  η υπέργεια βιομάζα) διάφορων τύπων βλάστησης της Καλιφόρνια και NDVI, υπολογισμένα από δεδομένα των καναλιών των NOAA-AVHRR. Χρησιμοποιώντας τον  $\ln(GP_{mass})$  σαν μεταβλητή στη θέση του  $\ln(P_{mass})$ , οι συντελεστές συσχέτισης ήταν υψηλότεροι, επιβεβαιώνοντας την ανάγκη μέτρησης του λόγου των πράσινων μερών των φυτών προς τα μη-πράσινα για την βελτίωση της σχέσης φυτομάζας και δεικτών βλάστησης.

Το έλλειμμα νερού για παρατεταμένη περίοδο, σε συνδυασμό με την έντονη διαπνοή των φυτών, οδηγεί στη διάσπαση της χλωροφύλλης στα φύλλα και συνεπώς σε μικρές τιμές του δείκτη βλάστησης. Είναι δυνατό όμως αυτό το φαινόμενο να είναι παροδικό και να μην έχει καμία επίπτωση στην τελική παραγωγή. Τα «εσφαλμένα» δεδομένα που θα δώσει ο δείκτης βλάστησης θα οδηγήσουν και σε λάθος συμπεράσματα. Η απώλεια του πράσινου χρώματος των φύλλων λόγω έλλειψης χλωροφύλλης, μπορεί να μην οφείλεται στο έλλειμμα νερού, αλλά σε κάποια ασθένεια και έτσι να υπάρχουν συμπτώματα χλώρωσης ή να πρόκειται για προσβολή από ιό που καταστρέφει την χλωροφύλλη. Στις τελευταίες περιπτώσεις, υπάρχει μεγάλη επίδραση στην τελική παραγωγή της καλλιέργειας, η οποία μπορεί να μην ληφθεί υπόψη στον απαραίτητο βαθμό και έτσι να υπερεκτιμηθεί η παραγωγή.

#### 5.4.8 Υπολογισμός βιομάζας βαμβακιού στην Καρδίτσα

Το μοντέλο εκτίμησης βιομάζας εφαρμόστηκε στην περιοχή της Καρδίτσας, για την καλλιέργεια βαμβακιού. Τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν στην εργασία αυτή, προήλθαν από εικόνες των δορυφόρων NOAA. Η κάθε εικόνα έχει ληφθεί και στα 5 κανάλια του δορυφόρου NOAA-AVHRR. Κάθε ημέρα λαμβάνονταν δύο εικόνες από διαφορετικούς δορυφόρους της σειράς NOAA, μια ημερήσια και μια νυχτερινή, κατά τη διάρκεια τριών ετών (1994, 1995, 1996).

Η πρώτη επεξεργασία στην οποία υποβλήθηκαν οι εικόνες, ήταν η εξαγωγή του δείκτη βλάστησης NDVI. Από τις δύο εικόνες που είχαν ληφθεί κάθε ημέρα, χρησιμοποιήθηκε η ημερήσια εικόνα. Η μελέτη των φυτών, έχει δείξει ότι στις περισσότερες περιπτώσεις δεν υπάρχουν σημαντικές αλλαγές στην φυσιολογία τους από μέρα σε μέρα. Για το λόγο αυτό έχει καθιερωθεί η χρήση των δεκαημέρων. Για την δημιουργία των εικόνων που αντιπροσωπεύουν δεκαήμερα χρονικά διαστήματα, λαμβάνονται δέκα ημερήσιες εικόνες.

Από αυτές τις εικόνες αρχικά συγκρίνονται οι δύο πρώτες ως προς τις τιμές του κάθε εικονοστοιχείου και από τις τιμές των δύο εικονοστοιχείων που αντιστοιχούν στην ίδια περιοχή, απορρίπτεται η χαμηλότερη. Έτσι προκύπτει μία εικόνα όπου το κάθε εικονοστοιχείο περιέχει τη μέγιστη από τις τιμές των αντίστοιχων εικονοστοιχείων των δύο αρχικών εικόνων. Στη συνέχεια συγκρίνεται με αυτή, η ημερήσια εικόνα της τρίτης ημέρας με τον ίδιο τρόπο και προκύπτει μία ανάλογη εικόνα με τις μέγιστες τιμές των εικονοστοιχείων από τις τρεις εικόνες. Η διαδικασία συνεχίζεται μέχρι να έχουν συγκριθεί και οι

δέκα εικόνες, οπότε τα εικονοστοιχεία της τελικής εικόνας έχουν την μέγιστη τιμή από όλα τα αντίστοιχα των αρχικών εικόνων.

Αφού επιλέχθηκε η περιοχή που επρόκειτο να μελετηθεί, χρησιμοποιήθηκε πρόγραμμα επεξεργασίας εικόνας για να απομονωθούν το τμήμα της αρχικής πανελλαδικής εικόνας που επιλέχθηκαν. Το επόμενο βήμα περιλάμβανε τον υπολογισμό των «μέγιστων» εικόνων για κάθε έτος, και κάθε περιοχή. Η διαδικασία ήταν παρόμοια με αυτή της εξαγωγής δεκαήμερων που αναφέρθηκε παραπάνω, με τη διαφορά ότι τώρα δεν χρησιμοποιήθηκαν όλα τα δεκαήμερα, παρά μόνο αυτά στα οποία οι τιμές NDVI είχαν κάποια σημασία και αναφέρονταν στο βλαστικό κύκλο της καλλιέργειας. Έτσι και πάλι το κάθε εικονοστοιχείο της τελικής εικόνας προέκυπτε από το εικονοστοιχείο με την μέγιστη τιμή από τα δεκαήμερα που χρησιμοποιήθηκαν. Κατόπιν εφαρμόστηκε το μοντέλο για κάθε εικονοστοιχείο της εικόνας.

Τα δεδομένα των αποδόσεων, προήλθαν από τις εκδόσεις της Εθνικής Στατιστικής Υπηρεσίας της Ελλάδος που αφορούν τις εκτάσεις που καλλιεργήθηκαν σε κάθε έτος. Τα στοιχεία για την περιοχή της Καρδίτσας που χρησιμοποιήθηκαν παρουσιάζονται στο σχήμα 5.20 και στον πίνακα 5.5. Στο σχήμα 5.20 γίνεται η γραφική αναπαράσταση των μέσων τιμών του μοντέλου και των αντίστοιχων αποδόσεων.

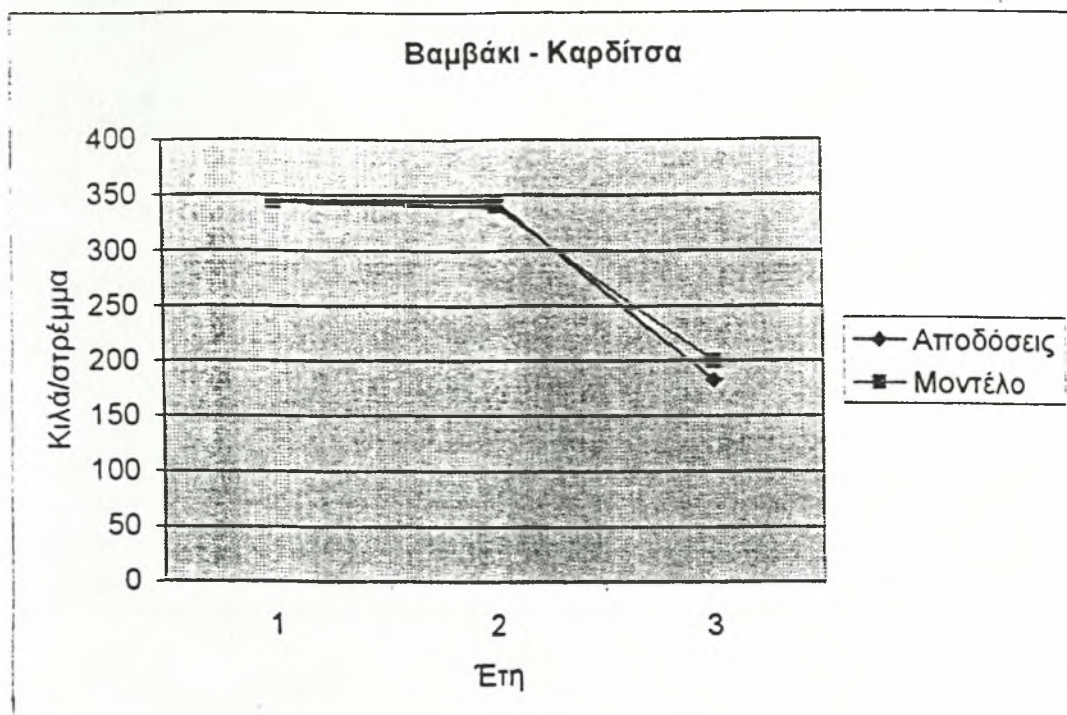
Από τις αρχές της χρήσης των δορυφορικών δεδομένων, ένα από τα σημαντικότερα προβλήματα που απασχολούσε την ερευνητική κοινότητα ήταν η αναγνώριση και παρακολούθηση του γήινου περιβάλλοντος. Μία τυπική δορυφορική εικόνα, στην αρχική της μορφή, αποτελείται από ομοιογενείς ή μη περιοχές τοποθετημένες σε κάποια διάταξη. Κάθε μία από τις περιοχές αυτές περιλαμβάνει μία «κλάση» της κάλυψης γης. Αυτές οι ομοιογενείς περιοχές είναι τα «αντικείμενα» της εικόνας.

Σκοπός μιας βασικής επεξεργασίας των δορυφορικών δεδομένων είναι ο εντοπισμός και αναγνώριση (ταξινόμηση) των αντικειμένων και η παρουσία των σε μορφή χάρτου ή/και πινάκων. Ο εντοπισμός και τα χωρικά χαρακτηριστικά (spatial features) (μέγεθος, σχήμα, κατεύθυνση) των αντικειμένων προσδιορίζονται μέσω των αλλαγών των μέσων τιμών των φασματικών ιδιοτήτων των. Αυτά τα χωρικά χαρακτηριστικά επιτρέπουν και την εξέταση των μεταβολών που λαμβάνουν χώρα στα αντικείμενα. Όμως, επιτρέπουν μόνο μία γενική κατάταξη των αντικειμένων της εικόνας. Οι μέθοδοι ταξινόμησης, τις περισσότερες φορές, βασίζονται στα φασματικά χαρακτηριστικά χρησιμοποιώντας τεχνικές αναγνώρισης προτύπων.

Η ταξινόμηση των πολυφασματικών εικόνων βασίζεται στην εφαρμογή ενός απλού κανόνα απόφασης (decision rule) σε κάθε εικονοστοιχείο. Αυτό σημαίνει ότι κάθε εικονοστοιχείο ταξινομείται ξεχωριστά μόνο βάσει των φασματικών μετρήσεων. Βασική προϋπόθεση είναι ότι ένα αντικείμενο είναι αρκετά μεγαλύτερο από το μέγεθος του εικονοστοιχείου. Διαφορετικά ένα μεγάλο ποσοστό εικονοστοιχείων μπορεί να αποτελείται από δύο ή περισσότερα αντικείμενα, κάνοντας την στατιστική ταξινόμηση αναξιόπιστη. Αυτό θα έχει σαν συνέπεια ότι οι προσδιορισμένες κατηγορίες σύμφωνα με τις οποίες θα πρέπει να γίνει η ταξινόμηση της εικόνας, να μην είναι κατάλληλες για την περιγραφή της πραγματικής κατάστασης της φύσης.

Η επιβλεπόμενη ταξινόμηση χρησιμοποιείται για την ποσοτική ανάλυση των τηλεπισκοπικών δεδομένων, χρησιμοποιώντας αλγόριθμους οι οποίοι κατατάσσουν τα εικονοστοιχεία μιας εικόνας ανάλογα με την κατηγορία στην οποία ανήκουν.





**Σχήμα 5.20** Διακυμάνσεις αποδόσεων και τιμών του μοντέλου για την καλλιέργεια βαμβακιού στην περιοχή της Καρδίτσας

**Πίνακας 5.5** Ενδεικτικές τιμές δείκτη βλάστησης σε διάφορες μορφές κάλυψης εδάφους

Βαμβάκι	Καρδίτσα					
	Στοιχεία Στατιστικής Υπηρεσίας			Εφαρμογή Μοντέλου		
	Έκταση (στρέμματα)	Παραγωγή (τόνοι)	Απόδοση (κιλά / στρέμμα)	Μέση	Μέγιστη	Ελάχιστη
1994	735198	253557	344.88	343.5	679.1	39.9
1995	735198	253291	344.52	339.7	658.3	-40.7
1996	728247	132845	182.42	200	607.5	-159.7

Οι αλγόριθμοι αυτοί στηρίζονται κυρίως στη θεωρία των πιθανοτήτων. Τα βασικά βήματα που ακολουθούνται κατά τη διαδικασία της ταξινόμησης είναι:

(α) Προσδιορισμός του αριθμού των κλάσεων στις οποίες θα χωριστεί η εικόνα (π.χ. νερό, έδαφος, διάφορα είδη καλλιεργειών). Στο στάδιο αυτό καθορίζεται, αντικειμενικά, ο αριθμός των τάξεων που θα χρησιμοποιηθούν, ο οποίος και εξαρτάται από τον σκοπό της μελέτης και την περιοχή. Π.χ. όταν χρειάζεται να γίνει ταξινόμηση των ειδών βλάστησης μιας αγροτικής περιοχής τότε οι διαφορετικές καλλιέργειες λαμβάνονται σαν ξεχωριστές κλάσεις. Όταν το ενδιαφέρον στρέφεται σε γενικότερη ταξινόμηση της περιοχής (π.χ. αγροτική, αστική, υδάτινη) τότε τα είδη βλάστησης λαμβάνονται σαν μία κατηγορία.

(β) Επιλογή πρωτοτύπων εικονοστοιχείων από κάθε κλάση, τα οποία αποτελούν τα εκπαιδευτικά δεδομένα. Η επιλογή γίνεται βάσει πληροφοριών που συλλέγονται από κατά τόπους επισκέψεις, αεροφωτογραφίες κ.λ.π. Η δειγματοληψία των προτύπων πρέπει να είναι αντιπροσωπευτική και, εάν αυτό είναι δυνατόν, να γίνει από όλη την περιοχή της εικόνας. Το στάδιο αυτό είναι σημαντικό γιατί θα καθορίσει το ποσοστό ακρίβειας της ταξινόμησης.

(γ) Προσδιορισμός των παραμέτρων των ταξινομητών που πρόκειται να χρησιμοποιηθούν. Οι παράμετροι αυτές λέγονται υπογραφές των δεδομένων.

(δ) Ένταξη κάθε εικονοστοιχείου της εικόνας σε μία από τις κλάσεις, που έχουν προσδιοριστεί, χρησιμοποιώντας τον εκπαιδευμένο ταξινομητή.

(ε) Δημιουργία πινάκων σε μορφή πίνακα ή θεματικών χαρτών που δίνουν τα αποτελέσματα της ταξινόμησης.

Δύο από τους πιο διαδεδομένους αλγόριθμους που μπορούν να χρησιμοποιηθούν στα βήματα (γ) και (δ) είναι η ταξινόμηση με τη μέθοδο της μέγιστης πιθανοφάνειας και η ορθογώνια παραλληλεπιπεδοειδής ταξινόμηση.

Η ανεξάρτητη ταξινόμηση δεν απαιτεί γνώση της εικόνας εκ των προτέρων, αλλά εφαρμόζει υποδιαιρέσεις που βασίζονται σε «εσωτερικές» ιδιότητες των εικόνων. Οι ψηφιακές τιμές κάθε εικονοστοιχείου, σε κάθε μήκος κύματος, εξετάζονται και κατόπιν η εικόνα υποδιαιρείται σε έναν αριθμό κλάσεων. Σχεδόν όλα τα λογισμικά επεξεργασίας εικόνων επιτρέπουν στον χρήστη να ορίσει τον αριθμό των κλάσεων ή τις φασματικές διαφορές που θα πρέπει να υπάρχουν μεταξύ των κλάσεων.

Στην πράξη, για εξοικονόμηση χρόνου, η αρχική ομαδοποίηση ξεκινάει με την αναγνώριση των «φυσικών κλάσεων» εξετάζοντας μόνο ένα δείγμα από το σύνολο των εικονοστοιχείων της εικόνας. Κατόπιν καθορίζονται στατιστικές ποσότητες των κλάσεων και ακολουθεί η ταξινόμηση ολόκληρης της εικόνας.

Η μέθοδος αυτή είναι σχετικά γρήγορη και επιτρέπει στον χρήστη να λάβει μία αντικειμενική εικόνα των κύριων φασματικών τύπων. Βάσει αυτών των αποτελεσμάτων μπορεί να ακολουθήσει επιβλεπόμενη ταξινόμηση.

Μία από τις τεχνικές ανεξάρτητης ταξινόμησης είναι η ομαδοποίηση. Στην τεχνική αυτή γίνεται η κατάταξη των εικονοστοιχείων της εικόνας σε ομάδες με το κριτήριο ότι τα εικονοστοιχεία της ίδιας ομάδας πρέπει να έχουν κάποιες ομοιότητες. Σαν ομάδα μπορεί να οριστεί το σύνολο εικονοστοιχείων που η απόσταση μεταξύ δύο τυχαίων προτύπων, που ανήκουν στην ίδια

ομάδα είναι μικρότερη από την απόσταση μεταξύ κάθε εικονοστοιχείου μιας ομάδας με κάθε εικονοστοιχείο άλλης ομάδας.

Στην τεχνική της ομαδοποίησης χρειάζεται να καθοριστεί ένα μέτρο βάσει του οποίου θα γίνει η μέτρηση ομοιότητας μεταξύ των προτύπων και ο χωρισμός των προτύπων σε ομάδες.

Μια μέθοδος χωρισμού της εικόνας σε ομάδες, χρησιμοποιεί τα ιστογράμματα πυκνότητας της πολυφασματικής εικόνας και την τεχνική του ιστογράμματος ισότητας. Με την τεχνική του ιστογράμματος ισότητας η εικόνα χωρίζεται σε τμήματα ίσης πυκνότητας εικονοστοιχείων.

Αφού προσδιοριστεί ο αριθμός των κλάσεων στην εικόνα, ακολουθεί η ταξινόμηση. Για κάθε εικονοστοιχείο υπολογίζεται το μέτρο ομοιότητας με όλες τις ομάδες, το οποίο χρησιμοποιείται σαν κριτήριο ταξινόμησης. Η κάθε ψηφίδα καταχωρείται στην ομάδα με την οποία έχει το μεγαλύτερο μέτρο ομοιότητας.

Συνήθως χρησιμοποιούνται δύο κριτήρια ομοιότητας. Το ένα είναι η Ευκλείδεια απόσταση της ψηφίδας από όλες τις ομάδες όπου η κάθε ψηφίδα καταχωρείται στην ομάδα που απέχει την μικρότερη απόσταση, δηλαδή έχει το μεγαλύτερο μέτρο ομοιότητας. Το δεύτερο κριτήριο είναι η Mahalanobis απόσταση κάθε ψηφίδας από όλες τις ομάδες.

Η ακρίβεια μιας ταξινόμησης καθορίζεται από τον αριθμό των εικονοστοιχείων που καταχωρούνται στη σωστή ή σε λανθασμένη κλάση. Για τον προσδιορισμό του βαθμού ακρίβειας μιας μεθόδου ταξινόμησης χρησιμοποιείται ενός NxN πίνακας (N ο αριθμός των κλάσεων). Ο πίνακας ενός ονομάζεται πίνακας σύγχυσης και δίνει το συνολικό ποσοστό ακρίβειας ενός ταξινόμησης, καθώς ενός και την ακρίβεια ανά κλάση. Στον παρακάτω πίνακα δίνεται ένα παράδειγμα για την περίπτωση κατά την οποία η εικόνα έχει ταξινομηθεί σε δύο κλάσεις (καμένη έκταση και μη καμένη). Ενός φαίνεται το ποσοστό ακρίβειας ενός μεθόδου που έχει εφαρμοστεί είναι 85,46%.

**Πίνακας 5.6** Πίνακας σύγκρισης για την σύγκριση των εικονοστοιχείων ενός χάρτη αναφοράς με τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την ανάλυση εικόνων NOAA/AVHRR για την χαρτογράφηση καμένων εκτάσεων

	Καμένη έκταση	Μη καμένη έκταση	
<b>Υπολογισμένη Καμένη έκταση</b>	49947	8139	58086
<b>Υπολογισμένη μη καμένη έκταση</b>	18160	104605	122765
	68107	112744	85.46 %



## 5.5 Παραδείγματα αιτιοκρατικών μοντέλων

Το αντικείμενο αυτού του κεφαλαίου είναι η περιγραφή του επιπέδου ανάπτυξης μερικών από τα μοντέλα τα οποία είναι διαθέσιμα σαν προγράμματα στους υπολογιστές. Αυτά τα μοντέλα αναπτύχθηκαν για την προσομοίωση της αύξησης των φυτών και των καλλιεργειών, τον συγχρονισμό των φαινολογικών γεγονότων και την ανάπτυξη του σιταριού όπου αυτό μπορεί να αναπτυχθεί.

Το AFRC κυρίως χρησιμοποιείται στην προσομοίωση της αύξησης και της ανάπτυξης του σιταριού κάτω από Ευρωπαϊκές συνθήκες ακόμα και αν έχει δοκιμαστεί και σε άλλα μέρη του κόσμου. Το CERES έχει αποτιμηθεί και προσαρμοσθεί σε μεγαλύτερο εύρος συνθηκών. Τα περισσότερα από τα παρακάτω μοντέλα λειτουργούν σε καθημερινή βάση και απαιτούν καθημερινά μετεωρολογικά δεδομένα. Η σχέση μεταξύ αυτών των δεδομένων και της αύξησης και ανάπτυξης της καλλιέργειας εξαρτάται από τον γενότυπο έτσι ώστε παράμετροι θα πρέπει να προσαρμοστούν στα μοντέλα για να εκτιμούνται αυτές οι ποικίλες διαφορές.

Τα μοντέλα επίσης περιέχουν αλγόριθμους που μειώνουν τη δυναμική παραγωγή σε σχέση με την έλλειψη του νερού και του αζώτου, αλλά οι επιδράσεις των εχθρών και των ασθενειών δεν λαμβάνονται υπόψη, ακόμα και αν μη πλήρως επεξεργασμένα μοντέλα που συνδυάζουν αυτά των εχθρών και των καλλιεργειών υπάρχουν στην βιβλιογραφία (Teng and Yuen 1990).

Το φαινολογικό υπομοντέλο του AFRC προβλέπει τις ημέρες έναρξης και λήξης των 4 φάσεων, από την σπορά έως το φύτρωμα, από το φύτρωμα έως την διπλή κορυφή, από την διπλή κορυφή έως την άνθηση και από την άνθηση ως την ωρίμανση. Η ωρίμανση έχει επιλεγεί να αντιπροσωπεύει την ημέρα συγκομιδής. Δευτερεύον τα στάδια έχουν προστεθεί για να διαχωρίσουν αυτές τις κύριες φάσεις και να δώσουν μια καλύτερη περιγραφή της ανάπτυξης του σιταριού.

Το CERES περιέχει εννέα φάσεις ανάπτυξης αριθμημένες από το 1 έως το 9. Από το 1 έως το 6 είναι οι φάσεις ανάπτυξης πάνω από την επιφάνεια του εδάφους με αρχή από το φύτρωμα, το ακραίο στάχυ, την άνθηση και τελικά την ωρίμανση με την οποία και λήγει ο κύκλος. Η φάση 7 είναι αυτή πριν από τη σπορά και χρησιμοποιείται για τον έλεγχο του υδατικού ισοζυγίου στο έδαφος. Οι φάσεις 8 και 9 καλύπτουν την περίοδο από τη σπορά μέχρι το φύτρωμα.

### 5.5.1 WOFOST (World Food Studies)

Το WOFOST είναι ένα μοντέλο που προσομοιώνει την ανάπτυξη και την παραγωγή ετήσιων καλλιεργειών. Επιτρέπει την ποσοτική εκτίμηση της εν δυνάμει ανάπτυξης της καλλιέργειας κάτω από ορισμένες εδαφικές και κλιματικές συνθήκες. Τέτοιες εκτιμήσεις είναι η βάση για τον προσδιορισμό των επιλογών που θα εφαρμοστούν σε μια περιοχή για την αγροτική παραγωγή. Επίσης μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την ανάλυση της μεταβλητότητας και να κατευθύνουν την παραγωγή των καλλιεργειών.



- **Γενική περιγραφή του μοντέλου.** Όπως όλα τα μαθηματικά μοντέλα στη γεωργία το WOFOST είναι μια απλοποίηση της πραγματικότητας. Πρακτικά η απόδοση των καλλιεργειών είναι το αποτέλεσμα της αλληλεπίδρασης οικολογικών και κοινωνικών παραγόντων. Στο συγκεκριμένο μοντέλο περιέχονται μόνο οι οικολογικοί παράγοντες.

- **Παραγωγικά επίπεδα.** Διακρίνονται τρία ιεραρχικά επίπεδα της ανάπτυξης των καλλιεργειών.

1. Εν δυνάμει ανάπτυξη
2. Περιορισμένη ανάπτυξη
3. Μειωμένη ανάπτυξη

Καθένα από τα τρία στάδια αντιστοιχεί σε ένα επίπεδο παραγωγής δηλαδή στην εν δυνάμει, περιορισμένη και μειωμένη παραγωγή.

α) Εν δυνάμει παραγωγή, η ανάπτυξη της καλλιέργειας καθορίζεται μόνο από την ακτινοβολία, την θερμοκρασία και τα φυσιολογικά χαρακτηριστικά. Η συγκέντρωση του ατμοσφαιρικού CO<sub>2</sub> θεωρείται σταθερή.

β) Περιορισμένη παραγωγή, σ' αυτό το στάδιο επιπρόσθετα λαμβάνεται υπόψη εκτός των παραπάνω και η επίδραση της διαθεσιμότητας του νερού και των θρεπτικών. Εάν η παροχή του νερού ή των θρεπτικών είναι ανεπαρκή κατά την καλλιεργητική περίοδο αυτό οδηγεί σε περιορισμένη παραγωγή η οποία είναι μικρότερη από την εν δυνάμει παραγωγή.

γ) Μειωμένη παραγωγή, σ' αυτό το επίπεδο η πιθανή μείωση στην απόδοση των καλλιεργειών οφείλεται κυρίως σε βιοτικούς παράγοντες όπως τα ζιζάνια, τα παράσιτα και οι ασθένειες.

Στη πράξη κανένα από τα παραπάνω επίπεδα ανάπτυξης-παραγωγής δεν ανταποκρίνεται σε πραγματικές συνθήκες. Είναι όμως απαραίτητο να ορισθούν οι κατηγορίες ώστε να επικεντρωθεί το θέμα στους κύριους περιοριστικούς παράγοντες της παραγωγής όπως το φως, η θερμοκρασία, το νερό και τα μακροστοιχεία (N,P,K).

Με το WOFOST είναι δυνατός ο υπολογισμός της εν δυνάμει παραγωγής που οφείλεται σε περιορισμένη διαθεσιμότητα νερού και θρεπτικών. Οι περιοριστικοί αυτοί παράγοντες δεν λαμβάνονται υπόψη. Τα παραγωγικά επίπεδα ιεραρχούνται πλήρως με το WOFOST. Η εν δυνάμει παραγωγή είναι το υψηλότερο επίπεδο. Το δεύτερο επίπεδο είναι περιορισμένη παραγωγή λόγω του νερού ενώ το τρίτο επίπεδο λόγω των θρεπτικών και δεν είναι ποτέ μεγαλύτερο από το δεύτερο. Μόνο σαν περιοριστικός παράγοντας των θρεπτικών λαμβάνονται τα μακροστοιχεία N, P και K.

- **Χρονική και χωρική κατανομή.** Σε κάθε εφαρμογή το μοντέλο προσομοιώνει την ανάπτυξη μια δεδομένης καλλιέργειας κάτω από συγκεκριμένες εδαφικές και κλιματολογικές συνθήκες. Επίσης πρέπει να προσδιορίζονται οι οριακές συνθήκες όπως ο βιολογικός κύκλος της καλλιέργειας, η θρεπτική κατάσταση του εδάφους και το υδατικό ισοζύγιο.

Για τη προσομοίωση χρησιμοποιούνται καθημερινά μετεωρολογικά δεδομένα πολλών ετών με πολλούς παραμέτρους και σε πολλές περιοχές. Σε μερικές περιπτώσεις μπορούν να χρησιμοποιηθούν μέσες μηνιαίες τιμές, εκτός της βροχόπτωσης, οι οποίες προκύπτουν από την γραμμική παρεμβολή.

- **Εφαρμογή του μοντέλου WOFOST.** Η τελευταία έκδοση του (Version 6) αναπτύχθηκε στα πλαίσια του προγράμματος «Μοντέλα πρόγνωσης των αποδόσεων» που εκδόθηκε από το ερευνητικό κέντρο Joint (J.R.C) της Ευρωπαϊκής Ένωσης για τη δράση τρία του σχεδίου MARS (Monitoring Agriculture with Remote Sensing).

- **Περιορισμοί του μοντέλου.** Επειδή το μοντέλο είναι μια απλοποίηση της πραγματικότητας πρέπει να δίνεται η δέουσα προσοχή κατά την εξαγωγή των συμπερασμάτων που προκύπτουν από τα αποτελέσματα της προσομοίωσης. Πρέπει να λαμβάνεται υπόψη ότι η ποιότητα των αποτελεσμάτων του μοντέλου εξαρτάται από την ποιότητα των δεδομένων εισαγωγής. Επομένως η προσεκτική επιλογή των εισαγόμενων δεδομένων είναι μεγίστης σημασίας. Σαν γενικό κανόνα πρέπει να τηρείται το εξής: δεν πρέπει να προσομοιώνεται η ανάπτυξη της καλλιέργειας χωρίς πειραματισμό. Ο πειραματισμός είναι απαραίτητος για να προσδιορίσει τις παραμέτρους, να βαθμονομήσει και να επαληθεύσει τα αποτελέσματα του μοντέλου.

Μια αδυναμία του WOFOST καθώς και όλων των άλλων μοντέλων προσομοίωσης της ανάπτυξης είναι ότι ορισμένοι παράμετροι θεωρούνται σταθεροί ενώ στη πράξη είναι γνωστό ότι μεταβάλλονται.

- **Θεωρητικό υπόβαθρο, Ανάλυση του συστήματος και προσομοίωση.** Στο WOFOST η ανάλυση συστημάτων και η προσομοίωση εφαρμόζονται στη γεωργική παραγωγή. Αυτή η προσέγγιση χαρακτηρίζεται από τους όρους Συστήματα, Μοντέλα και Προσομοίωση.

Σύστημα είναι ένα μικρό κομμάτι της πραγματικότητας που περιέχει αλληλοεξαρτώμενα στοιχεία

Μοντέλο είναι η απλοποιημένη αναπαράσταση του συστήματος και

Προσομοίωση είναι η δημιουργία μαθηματικών μοντέλων και η μελέτη της συμπεριφοράς τους σε σχέση με το σύστημα που αναπαριστούν.

Το WOFOST είναι ένα δυναμικό αιτιοκρατικό μοντέλο που προσομοιώνει την ανάπτυξη μιας καλλιέργειας με χρονικά βήματα μιας ημέρας βασισμένα στη γνώση των διαδικασιών στο χαμηλότερο επίπεδο ολοκλήρωσης. Παρόλα αυτά κάποια μέρη του μοντέλου είναι περιγραφικά και/ή στατικά. Αυτό οφείλεται κυρίως στο γεγονός ότι μερικές εμπλεκόμενες διαδικασίες δεν έχουν ακόμη πλήρως κατανοηθεί.

#### 5.5.1.1. Προσομοίωση της ανάπτυξης της καλλιέργειας

- **Γενικά χαρακτηριστικά.** Στο WOFOST η ανάπτυξη προσομοιώνεται με βάση τις οικοφυσιολογικές διαδικασίες. Κύριες διαδικασίες είναι η φαινολογική εξέλιξη, το ολικό αφομοίωσιμο CO<sub>2</sub> μιας καλλιέργειας, την αναπνοή, διαπνοή, την αποθήκευση των προϊόντων αφομοίωσης στα διάφορα φυτικά όργανα και τον σχηματισμό της ξηράς ουσίας. (σχήμα 5.21).

- **Αφομοίωση και αναπνοή.** Ο συνολικός ημερήσιος ρυθμός αφομοίωσης του CO<sub>2</sub> μιας καλλιέργειας υπολογίζεται από την αποροφούμενη ακτινοβολία ( $I_a$ ) και την καμπύλη της φωτοσυνθετικής ικανότητας των φύλλων. (σχήμα 5.22). Αυτή η σχέση εξαρτάται από τη θερμοκρασία και την ηλικία του φύλλου. Η αποροφούμενη ακτινοβολία υπολογίζεται από τη συνολική

προσπίπτουσα ακτινοβολία και τη φυλλική επιφάνεια. Επειδή η σχέση της φωτοσυνθετικής ικανότητας ως προς την ένταση του φωτός δεν είναι γραμμική λαμβάνεται υπόψη η χωρική και χρονική μεταβολή στα επίπεδα της ακτινοβολίας.

Οι εξισώσεις με τις οποίες περιγράφεται το φαινόμενο δίνονται παρακάτω:

$$I_o = I \times \sin \beta \quad (5-70)$$

$I_o$ : μετρούμενη ακτινοβολία

$I$ : ηλιακή σταθερά ( $\text{Jm}^{-2}\text{s}^{-1}$ )

$\beta$ : ύψος του ηλίου

$$I_L = (1 - \rho) \times I_o \times e^{-kL} \quad (5-71)$$

$I_L$ : ροή καθαρής ακτινοβολίας σε βάθος  $L$

$\rho$ : συντελεστής ανάκλασης

$k$ : συντελεστής απορρόφησης

$L$ : δείκτης φυλλικής επιφάνειας

$$I_{aL} = dI_L/dL = k \times (1 - \rho) \times I_o \times e^{-kL} \quad (5-72)$$

$I_{aL}$ : απορροφούμενη ακτινοβολία από την φυλλική επιφάνεια  $L$

$$A_L = A_m \times (1 - \exp(-\varepsilon \times I_{aL}/A_m)) \quad (5-73)$$

$A_L$ : συνολικός ρυθμός αφομοίωσης  $\text{CO}_2$  ( $\text{Kg}(\text{CO}_2) \text{m}^{-2}(\text{φύλλου}) \text{s}^{-1}$ )

$A_m$ : μέγιστος ρυθμός αφομοίωσης  $\text{CO}_2$  ( $\text{Kg}(\text{CO}_2) \text{m}^{-2}(\text{φύλλου}) \text{s}^{-1}$ )

$\varepsilon$ : αρχική ικανότητα χρησιμοποίησης της ακτινοβολίας  $\text{Kg}(\text{CO}_2) \text{J}^{-1}$  (απορροφούμενο PAR)

Το  $\varepsilon$  και το  $A_m$  εξαρτώνται από την θερμοκρασία ενώ τα  $k, \rho$  και  $A_m$  εξαρτώνται από την καλλιέργεια (Το  $A_m$  των  $C_4$  φυτών είναι μεγαλύτερο απ' αυτό των  $C_3$ ). (σχήμα 5.22).

- **Φαινολογική ανάπτυξη.** Η φαινολογική ανάπτυξη μιας καλλιέργειας χαρακτηρίζεται από τη σειρά και το ρυθμό εμφάνισης των βλαστικών και αναπαραγωγικών οργάνων. (σχήματα 5.23, 5.24)

$$D = (\int T_e) / T_{rec} \quad (5-74)$$

$$T_e = T - T_{Base} \quad (5-75)$$

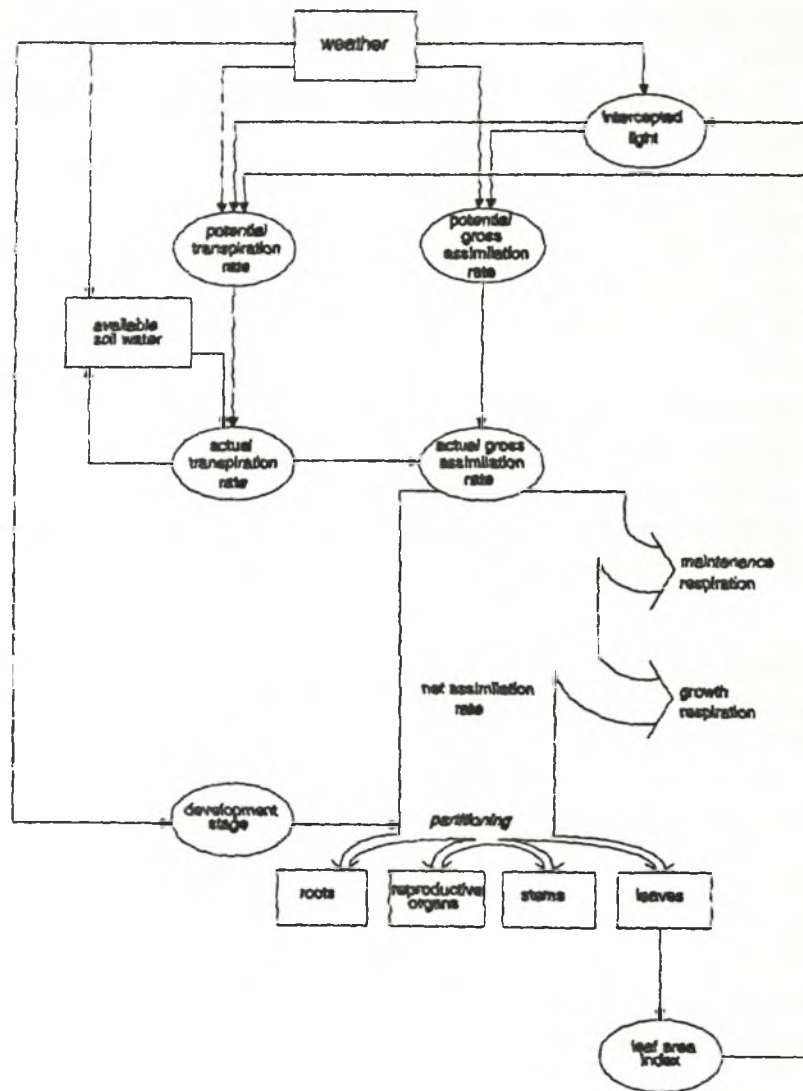
$D$ : φαινολογικό στάδιο

$T_e$ : Η διαφορά μεταξύ της μέσης ημερήσιας θερμοκρασίας ( $T$ ) και της θερμοβαθμίδας ( $T_{rec}$ )

$T_{rec}$ : η θερμοβαθμίδα που απαιτείται για να αλλάξει το φαινολογικό στάδιο

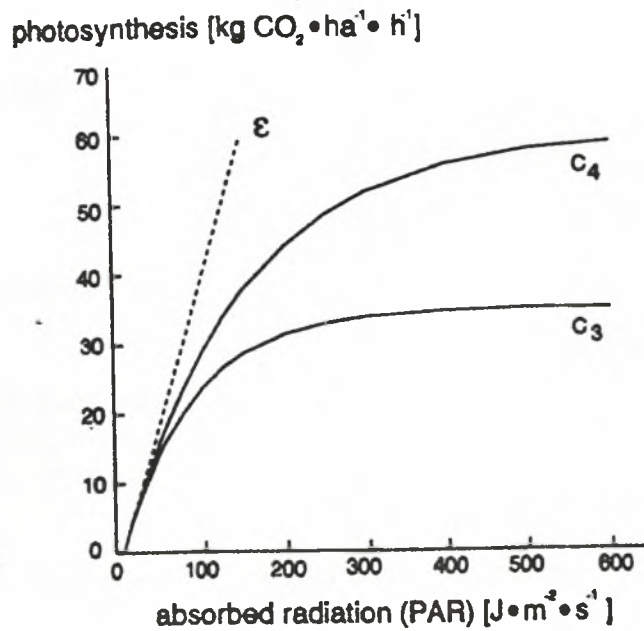
$T$ : μέση ημερήσια θερμοκρασία ( $^{\circ}\text{C}$ )

$T_{Base}$ : θερμοκρασία κάτω από την οποία δεν υπάρχει ανάπτυξη



**Σχήμα 5.21** Απλοποιημένη δομή ενός δυναμικού ερμηνευτικού μοντέλου φυτικής αύξησης.





**Σχήμα 5.22** Καμπύλες της αντίδρασης της φωτοσύνθεσης και του φωτός ξεχωριστών φύλλων κριθαριού ( $\text{C}_3$ ) και καλαμποκιού ( $\text{C}_4$ ).

$$F_{pr} = (P - P_c) / (P - P_c) \quad 0 \leq F_{pr} \leq 1 \quad (5-76)$$

$$D = F_{pr} \times ((\int T_e) / T_{rec}) \quad (5-77)$$

P: φωτοπερίοδος

P<sub>0</sub>: μέγιστη φωτοπερίοδος

P<sub>c</sub>: κριτική φωτοπερίοδος

F<sub>pr</sub>: Παράγοντας αναγωγής φωτοπεριόδου για το ρυθμό ανάπτυξης μέχρι την άνθηση.

• **Διαπνοή.**

$$A = T_a / T_p * A_p \quad (5-78)$$

A: ρυθμός αφομοίωσης (Kg ha<sup>-1</sup> d<sup>-1</sup>)

A<sub>p</sub>: εν δυνάμει ρυθμός αφομοίωσης (Kg ha<sup>-1</sup> d<sup>-1</sup>)

T<sub>a</sub>: ενεργός ρυθμός διαπνοής (mm d<sup>-1</sup>)

T<sub>p</sub>: εν δυνάμει ρυθμός διαπνοής (mm d<sup>-1</sup>)

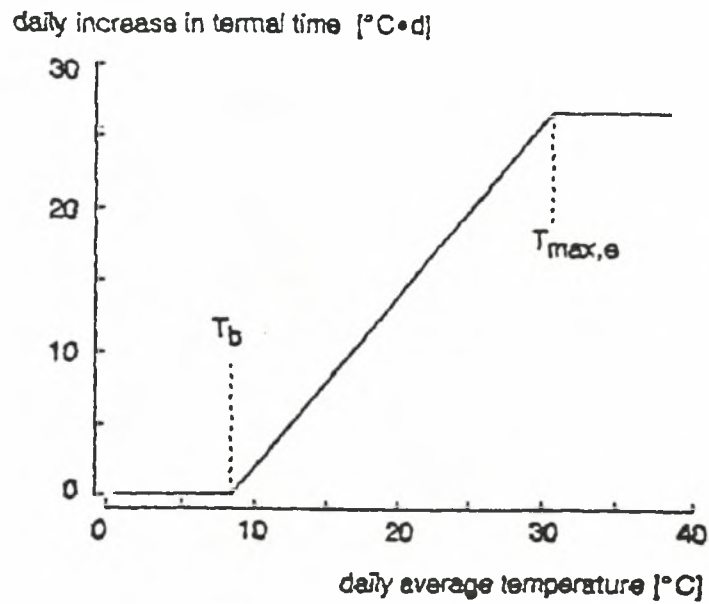
Το T<sub>p</sub> εξαρτάται από τη φυλλική επιφάνεια και το υδατικό έλλειμμα της ατμόσφαιρας. (σχήμα 5.25)

- **Υδατικό ισοζύγιο του εδάφους.** Το έδαφος χωρίζεται σε τρεις ζώνες: την R<sub>Dact</sub> που είναι το ενεργό ριζόστρωμα, τη χαμηλότερη ζώνη και η ζώνη του υπόγειου νερού. Το μέγιστο ριζόστρωμα είναι το RD<sub>m</sub>. Όταν το υπόγειο νερό εισέρχεται στο ριζόστρωμα τότε αυτό υποδιαιρείται σε ακόρεστη και κορεσμένη ζώνη.

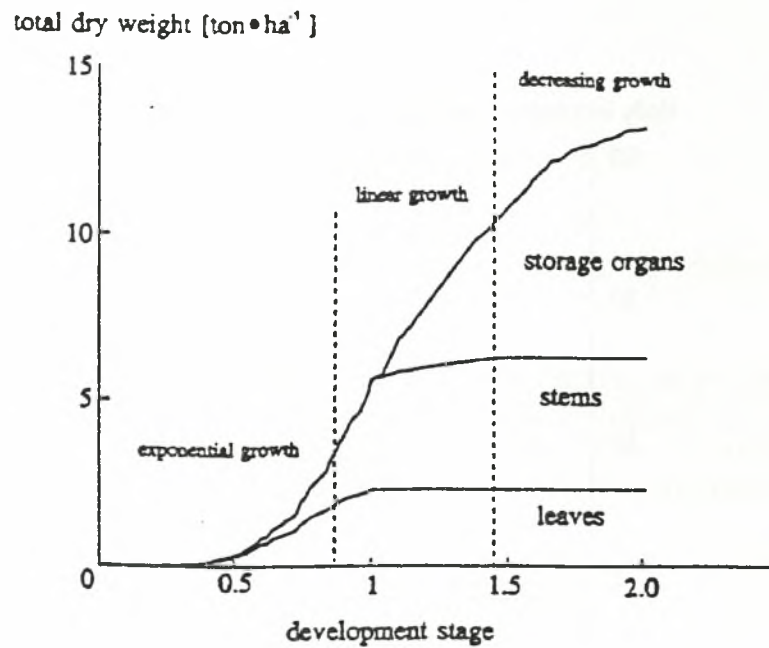
Για την εκτίμηση της εδαφική υγρασίας λαμβάνονται υπόψη οι εξής παράμετροι: (σχήμα 5.26)

1. Βροχόπτωση R
2. Επιφανειακή χωρητικότητα SS
3. Έκπλυση SR
4. Επιφανειακή εξάτμιση E
5. Διαπνοή της καλλιέργειας T<sub>a</sub>
6. Βαθιά διήθηση PC
7. Τριχοειδή μετακίνηση στο ριζόστρωμα CR

Τα αποθέματα νερού από άρδευση ή επιφανειακές απορροές δεν λαμβάνονται υπόψη στο μοντέλο.

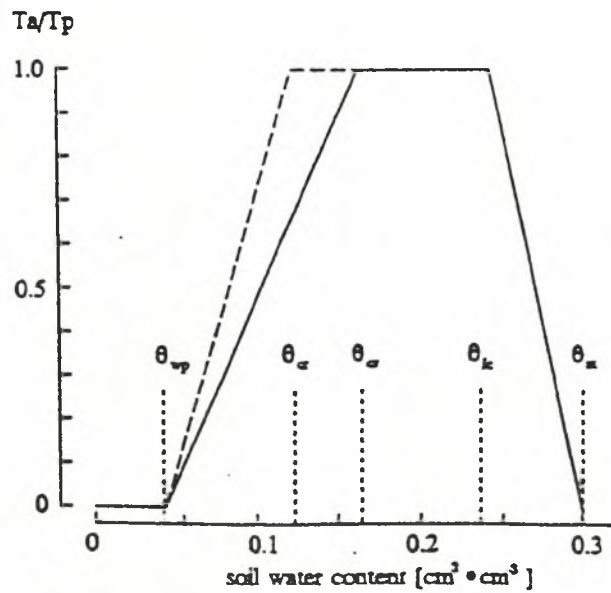


**Σχήμα 5.23..** Παράδειγμα της σχέσης μεταξύ μέσης ημερήσιας θερμοκρασίας ( $^{\circ}\text{C}$ ) και ημερήσιας αύξησης στον θερμικό χρόνο ( $^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}$ ) για τον υπολογισμό σταδίου ανάπτυξης φυτικής παραγωγής.

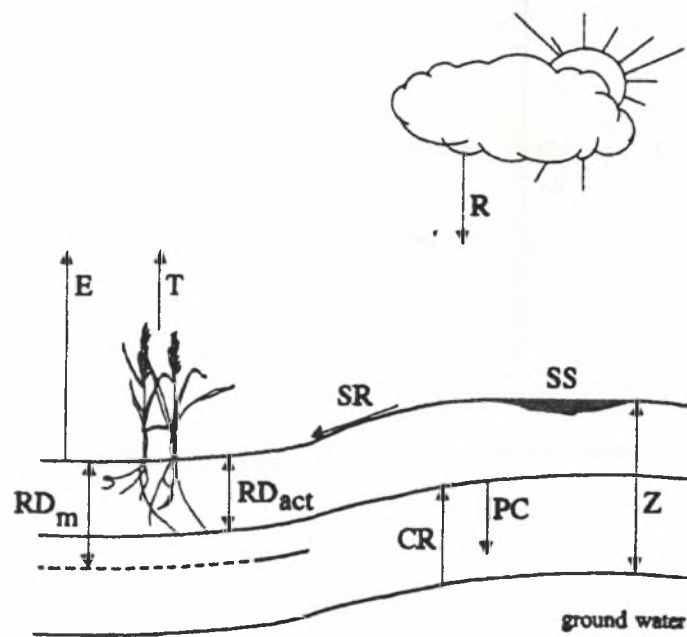


**Σχήμα 5.24** Παράδειγμα κατανομής ξηρής ύλης σε όργανα πάνω από το έδαφος σε σχέση με το στάδιο ανάπτυξης.





**Σχήμα 5.25** Σχέση μεταξύ περιεκτικότητας του εδάφους σε νερό  $\theta$  και  $T_a/T_r$  για παραγωγή / έδαφος συνδυασμό. Τα  $\theta_{wp}$ ,  $\theta_a$ ,  $\theta_k$ , αντιπροσωπεύουν την περιεκτικότητα νερού του εδάφους στο κριτικό σημείο για υποθετική εξάτμιση, εδαφική χωρητικότητα και κορεσμό, αντίστοιχα.



Σχήμα 5.26 Συστατικά ημερησίου ισοζυγίου εδαφικής υγρασίας.

- **Θρεπτικά.** Το μοντέλο μπορεί να υπολογίσει την ελάχιστη παραγωγή και το ποσό των θρεπτικών στοιχείων (μόνο N,P,K) που χρειάζονται για να επιτευχθεί η εν δυνάμει παραγωγή με περιορισμένα επίπεδα νερού. Οι υπολογισμοί γίνονται σύμφωνα με το μοντέλο QUEFTS (Quantitative Evaluation of Fertility of Tropical Soils) το οποίο ολοκληρώνεται στο WOFOST.

### 5.5.2 PlasmO

Το μοντέλο που ονομάζεται PlasmO (Plasmopara Simulation Model), προσομοιώνει το βιολογικό κύκλο του περονοσπόρου της αμπέλου, βασιζόμενο σε μετεωρολογικές παραμέτρους, επιτρέποντας έτσι τον υπολογισμό της καταλληλότερης εποχής για καταπολέμηση της ασθένειας. Το μοντέλο εκτιμήθηκε με αξιοπιστία κατά τη διάρκεια αρκετών ετών, συγκρίνοντας τα αποτελέσματα μετά από εφαρμογή παραδοσιακών μεθόδων διαχείρισης της καλλιέργειας, με αυτά που προέκυψαν από τη προσομοίωση της ασθένειας.

Το PlasmO υλοποιήθηκε μετά από συνεργασία μεταξύ διαφόρων ινστιτούτων της Φλωρεντίας: Ινστιτούτο Αγρομετεωρολογίας και Περιβαλλοντικών Αναλύσεων για τη Γεωργία, Εθνικό Συμβούλιο Έρευνας, Υπουργείο Γεωργίας και Διαχείρισης Εδαφών, Πανεπιστήμιο Φλωρεντίας, Κέντρο Εφαρμογής της Επιστήμης των Υπολογιστών στη Γεωργία και Ακαδημία Georgofili.

- Το μοντέλο. Το μοντέλο προσομοιώνει τον κύκλο ανάπτυξης της ασθένειας και τη προσβεβλημένη φυλλική επιφάνεια. Αυτό αποτελεί σημαντικό θέμα, γιατί σχετίζεται με το οικονομικό επίπεδο εφαρμογής μυκητοκτόνων. Τα δεδομένα τα οποία απαιτούνται για τη προσομοίωση, θερμοκρασία, σχετική υγρασία, βροχόπτωση, υγρότητα του φύλλου, μπορούν να συλλέγουν από μετεωρολογικούς σταθμούς με χρονικό βήμα μιας ώρας. Με αυτόν τον τρόπο, οι πληροφορίες που συλλέγονται σχετίζονται με τη πραγματική ανάπτυξη του παθογόνου και επιτρέπει την απόφαση για τη πιο ενδεδειγμένη μέθοδο καταπολέμησης.

Η αρχική κατάσταση του συστήματος χαρακτηρίζεται από την ημερομηνία έκπτυξης των οφθαλμών. Αυτό μπορεί εύκολα να γίνει αντιληπτό στον αγρό, όταν το 50% των οφθαλμών έχουν εκπτυχθεί και μικρά φυλλάρια έχουν αρχίσει να εμφανίζονται. Είναι δυνατό, σε οποιαδήποτε στιγμή της καλλιεργητικής περιόδου να εισαχθούν στο σύστημα στοιχεία της φυλλικής επιφάνειας και της έντασης της ασθένειας, η οποία μετράται στον αγρό. Το μοντέλο προσομοιώνει τις πιο σημαντικές φάσεις στο βιολογικό κύκλο του παθογόνου και προσδιορίζει τη χρονική στιγμή και την ένταση κάθε κύκλου μόλυνσης. Τα αποτελέσματα εκφράζονται σε ποσοστά και δείχνουν τη φυλλική επιφάνεια η οποία είναι καλυμμένη με το μυκήλιο του παθογόνου, η οποία καλείται κηλίδα ελαίου.

### 5.5.2.1 Εφαρμογή του Plasmio

Πριν ξεκινήσει η εφαρμογή του προγράμματος, είναι απαραίτητη η δημιουργία ενός αρχείου με το σύνολο των δεδομένων σε στήλες για κάθε παράμετρο σε μορφή txt. Σε μία επιπλέον στήλη μπορεί να εισαχθεί η παρατηρούμενη ένταση της ασθένειας σε εκατοστιαίο ποσοστό. Είναι απαραίτητο η τιμή αυτή να εισαχθεί την 13<sup>η</sup> ώρα της ημέρας που έχει παρθεί η παρατήρηση. Οι τιμές αυτές δε χρησιμοποιούνται από το μοντέλο κατά τη διαδικασία της προσομοίωσης, αλλά είναι χρήσιμες στον υπολογισμό των στατιστικών δεικτών της αξιολόγησης.

Η ένταση της ασθένειας εκφράζεται σαν ποσοστό και εκφράζει τη σχέση μεταξύ της προσβεβλημένης από το παθογόνο φυλλικής επιφάνειας και της συνολικής φυλλικής επιφάνειας. Ο βαθμός της προσβολής μπορεί να μετρηθεί οπτικά στον αμπελώνα και δείχνει το ποσοστό προσβεβλημένης φυλλικής επιφάνειας σε ένα δείγμα τουλάχιστον 100 φύλλων.

Το πρώτο παράθυρο κατά την εκκίνηση του μοντέλου, περιλαμβάνει 4 διαφορετικές επιλογές:

- Διαχείριση δεδομένων, επιτρέπει στον χρήστη την εισαγωγή των δεδομένων από το αρχείο που έχει ήδη ετοιμάσει και επιπλέον να ορισμό των συνθηκών εκκίνησης του μοντέλου, καθώς επίσης και τον ορισμό των παραμέτρων που απαιτούνται για τη προσομοίωση. Με την εισαγωγή του αρχείου, το πρόγραμμα απευθείας λαμβάνει υπόψη του 2 επιπλέον αρχεία που φέρουν το ίδιο όνομα. Το πρώτο φέρει την κατάληξη *ini* και αναφέρεται στις συνθήκες εκκίνησης της προσομοίωσης και το δεύτερο την κατάληξη *par* και αναφέρεται στις εισαγόμενες παραμέτρους.

- Συνθήκες εκκίνησης, περιλαμβάνουν την φυλλική επιφάνεια σε cm<sup>2</sup>, την εκατοστιαία ένταση της ασθένειας, την ημερομηνία που παρατηρήθηκε η έκπτυξη των οφθαλμών (50% έκπτυξης οφθαλμών στον αγρό) και ορίζεται και η χρονική διάρκεια σε μέρες που επιθυμείται να πραγματοποιηθεί η προσομοίωση.

- Το αρχείο των παραμέτρων περιλαμβάνει 22 από αυτές, αλλά εισαγωγή δεδομένων μπορεί να γίνει μόνο στις 4 πρώτες, οι οποίες είναι: η παράμετρος της σποροποίησης, η παράμετρος της ζωτικότητας των σπορίων, η παράμετρος της ζωτικότητας της κηλίδας ελαίου και η παράμετρος της μέγιστης φυλλικής επιφάνειας (χαρακτηριστικό της καλλιεργούμενης ποικιλίας αμπέλου.)

Μετά την εισαγωγή όλων των απαιτούμενων δεδομένων, το πρόγραμμα είναι έτοιμο να ξεκινήσει την προσομοίωση. Πρέπει να γίνει επιστροφή στο πρώτο παράθυρο της εκκίνησης του μοντέλου και επιλογή της εντολής Υπολογισμός (calculate). Το νέο αυτό παράθυρο περιλαμβάνει 4 εντολές:

- Υπολογισμό,
- Εντολή των γραφικών,
- Εντολή εκτύπωσης,
- Εντολή για την εξαγωγή των αποτελεσμάτων.

Με την πρώτη εντολή εμφανίζονται σε μια σελίδα τα αποτελέσματα της προσομοίωσης. Εδώ παρέχονται χρήσιμες πληροφορίες για τα αποτελέσματα της προσομοίωσης και τις συγκρίσεις με την παρατηρούμενη τάση της προσβολής. Επιπλέον υπολογίζονται αυτόματα στατιστικοί δείκτες της αξιοπιστίας της προσομοίωσης. Η εμφάνιση των αποτελεσμάτων αυτών



γίνεται σε 8 στήλες. Η πρώτη αναφέρει το όνομα του αρχείου από το οποίο χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα για τη διαδικασία της προσομοίωσης. Στη δεύτερη στήλη φαίνονται οι μέρες κατά τις οποίες πάρθηκαν παρατηρήσεις στον αγρό για την ένταση της ασθένειας. Οι παρατηρούμενες με τις προσομοιωμένες τιμές φαίνονται στην τρίτη και την τέταρτη στήλη αντίστοιχα. Στις υπόλοιπες στήλες εμφανίζονται οι υπολογισμένοι στατιστικοί δείκτες όπως το σφάλμα, το πραγματικό σχετικό σφάλμα, το απόλυτο σφάλμα, το απόλυτο σχετικό σφάλμα. Στο τέλος κάθε στήλης εμφανίζεται τέλος, ο μέσος όρος τον υπολογισθέντων τιμών.

Με την εφαρμογή στη συνέχεια της εντολής των γραφικών, υπάρχει η δυνατότητα πλωταρίσματος 4 διαφορετικών μεταβλητών,

1. παρατηρούμενη ένταση ασθένειας,
2. προσομοιωμένη ένταση ασθένειας,
3. φυλλική επιφάνεια και
4. προσβεβλημένη φυλλική επιφάνεια.

Από τις παραπάνω μεταβλητές μπορεί να εξαχθεί μια γραφική παράσταση η οποία μπορεί να δείξει ξεκάθαρα κατά πόσο οι παρατηρούμενες τιμές ταιριάζουν με τις προσομοιωμένες.

Η εφαρμογή εν συνεχεία της εντολής εξαγωγής δεδομένων επιτρέπει την εμφάνιση των δεδομένων που χρησιμοποιήθηκαν για τη προσομοίωση σε έναν πίνακα. Τέλος με την εντολή εκτύπωση, μπορούν να εκτυπωθούν τα στοιχεία τα οποία εμφανίζονται στο συγκεκριμένο παράθυρο.

### 5.5.2.2 Εφαρμογή του Plasmο σε πραγματικά δεδομένα

Έγινε προσπάθεια εφαρμογής του εν λόγω μοντέλου, χρησιμοποιώντας δεδομένα από τον Ελληνικό χώρο. Χρησιμοποιήθηκαν τιμές θερμοκρασίας αέρα, σχετικής υγρασίας και βροχόπτωσης από το σταθμό του Παλαμά του 1998. Οι τιμές της υγρότητας των φύλλων συμπληρώθηκαν εικονικά κατά προσέγγιση, αφού δεν υπήρχαν σχετικά δεδομένα, θεωρώντας πως υπήρχε υγρότητα φύλλου (=1) τις ημέρες κατά τις οποίες είχαμε βροχόπτωση και κατά τις ημέρες και ώρες όπου η σχετική υγρασία ήταν πάνω από 90%.

Τα αποτελέσματα φαίνονται στον πίνακα 5.6. Δε φάνηκε να υπάρχει συμφωνία μεταξύ προσομοιωμένων και παρατηρούμενων τιμών (οι οποίες ήταν και αυτές εικονικές). Το γεγονός αυτό, ενδεχομένως να οφείλεται στο ότι οι συνθήκες οι οποίες επικρατούσαν την άνοιξη και το καλοκαίρι του 1998 στην περιοχή του Παλαμά, (πολύ μικρό ποσοστό βροχοπτώσεων απαραίτητων για την εξέλιξη της προσβολής των πρέμνων από τον *Plasmopara viticola*), δεν ευνοούσαν καθόλου την ανάπτυξη της ασθένειας.

Οι τιμές που εμφανίζονται στη δεύτερη και τρίτη στήλη δηλώνουν το ποσοστό της επιφάνειας του φύλλου που έχει προσβληθεί από το παθογόνο, προς τη συνολική φυλλική επιφάνεια (μέσοι όροι σε δείγμα τουλάχιστον 100 φύλλων της μελετούμενης έκτασης του αμπελώνα).

Πίνακας 5.6.

Ημέρ α	Παρατηρούμε νη	Προσομοιωμέ νη	Παρατηρούμε νη-	Παρατηρούμε νη-	Απόλυτο σφάλμα	Απόλυτο σφάλμα
	Ένταση	Ένταση	Προσομοιωμέ νη	Προσομοιωμέ νη/ Παρατηρούμε νη	Παρατηρούμε νης-	Παρατηρούμε νης-
	Ασθένειας	Ασθένειας			Προσομοιωμέν νης	Προσομοιωμέν νης/ Παρατηρούμε νης
95	0,3	0,3	0	0	0	0
99	0,25	0,242	0,008	0,034	0,008	0,034
104	0,4	0,188	0,212	0,529	0,212	0,529
110	0,3	0,145	0,155	0,517	0,155	0,517
115	0,5	0,102	0,398	0,796	0,396	0,796
125	0,4	0,055	0,345	0,862	0,345	0,864
135	0,6	0,057	0,543	0,905	0,543	0,905
146	0,6	0,04	0,56	0,934	0,56	0,934
153	0,23	0,043	0,187	0,813	0,187	0,813
172	0,23	0,032	0,198	0,861	0,198	0,816
179	0,012	0,049	-0,037	-3,106	0,037	3,106
192	0,14	0,057	0,083	0,595	0,083	0,595
234	0,15	0,051	0,099	0,658	0,09	0,658
			0,212	0,338	0,217	0,816
M.O.						

### 5.5.3 PERO

Είναι μια προσπάθεια μοντελοποίησης της ασθένειας του περονόσπορου της αμπέλου ( *Plasmopara viticola* ) με πρόγραμμα σε Η/Υ. Το πρόγραμμα αποτελείται από το κύριο μοντέλο PERO και το υπομοντέλο DROPBEN που υπολογίζει την διαβροχή των φύλλων της αμπέλου. Με την εφαρμογή του προγράμματος είναι δυνατή η πρόγνωση της έναρξης της ασθένειας και η παραπέρα εξέλιξή της βασιζόμενη στην υπολογισμένη διάρκεια διαβροχής των φύλλων, καθοριστικού παράγοντα για την εξέλιξη του περονόσπορου.

Γενικώς, τα αρχεία του μοντέλου PERO μπορούν να ταξινομηθούν στις εξής δύο κατηγορίες :

1. αρχεία εισαγόμενων δεδομένων (input files) και
2. στα αρχεία εξαγόμενων δεδομένων (output files).

Με τη σειρά της, κάθε μια από αυτές τις κατηγορίες διαχωρίζεται σε δύο τύπους όπως δίδεται ακολούθως :





Στη συνέχεια περιγράφονται οι πιο πάνω τύποι αναλυτικά.

### INPUT FILES

-PERO.STA (δεδομένα εκκίνησης ) : σε αυτό το αρχείο εισάγονται στοιχεία όπως τα:

- LAT(γεωγραφικό πλάτος),
- KINP(δρόμος για τα εισαγόμενα),
- KOUT(δρόμος για τα εξαγόμενα),
- IYEAR(το έτος),
- STATIONB(αριθμός ή όνομα του βασικού σταθμού), DUMMY(XXX),
- DAYPRIM (προτοποθετημένη ημέρα αρχικών μολύνσεων σε ιουλιανές μέρες ή κενό) ,
- STATIONW( αριθμός/όνομα σταθμού μέτρησης διαβροχής των φύλλων),
- STATOUT (αριθμός/όνομα σταθμού εξαγόμενων), TIME(θερινή ώρα κεντρικής Ευρώπης).
- METD, RF, TL, BE
- METD : ημερήσιες τιμές θερμοκρασίας και βροχόπτωσης
- RF: ωριαίες τιμές σχετικής υγρασίας
- TL: ωριαίες τιμές θερμοκρασίας
- BE: υπολογιζόμενη ωριαία διαβροχή των φύλλων μέσω του υπομοντέλου DROPBEN

### OUTPUT FILES

-STATOUT INF: Το αρχείο αυτό χωρίζεται σε δύο μέρη.

α) Στο πρώτο δίδονται οι παράμετροι

- PTAG(E1,E2,E3)=ημέρα αρχικής μόλυνσης (E1,E2) και ημέρα των πρώτων ορατών κηλίδων (E3) ,
- CYC= αριθμός κύκλου ασθένειας,
- OUT=ημέρα εμφάνισης καρποφοριών του μύκητα (σποροποίηση) ,
- MULT= ρυθμός πολλαπλασιασμού (μέγιστο10.0),
- INF= επιτυχία μόλυνσης (NAI ή OXI).

β) Στο δεύτερο δίδονται οι παράμετροι

- CYC= αριθμός κύκλου ασθένειας,
- DATE= ημέρα του γεγονότος,
- INFSTART= ημέρα έναρξης μιας μόλυνσης ,
- SURV= ρυθμός επιβίωσης των κηλίδων ελαίου (μέγιστο 1.0 = 100%),
- SURVOILSUM=αριθμός επιζησάντων κηλίδων ελαίου (σύνολο),
- LATOILSUM=αριθμός λανθάνουσων κηλίδων ελαίου (σύνολο),
- REALOILSUM= αριθμός ορατών κηλίδων ελαίου (σύνολο),

-INFEND= ημέρα τέλους της μόλυνσης. Μετά την περίοδο επώασης της ασθένειας (INFEND) οι λανθάνουσες κηλίδες μετατρέπονται σε ορατές κηλίδες.

-STATOUT ENT: Εδώ γίνονται γνωστά τα εξής :

-DATE= ημέρες της υπολογιζόμενης περιόδου,

-SURVOIL = βασικός αριθμός νέων κηλίδων ελαίου, LATOILSUM= αριθμός λανθάνουσων κηλίδων ελαίου (σύνολο),

-REALOILSUM = αριθμός ορατών κηλίδων ελαίου (σύνολο),

-OILTOTAL= συνολικός αριθμός κηλίδων (λανθάνουσων και ορατών ).

• **Πρόγραμμα υποστήριξης του PERO.** Πριν ξεκινήσει το μοντέλο PERO την λειτουργία του είναι απαραίτητο να << τρέξει >> το υπομοντέλο DROPBEN ώστε να υπολογιστεί η ωριαία διαβροχή του φυλλώματος της αμπέλου. Τα εισαγόμενα και εξαγόμενα δεδομένα κατανέμονται κατά παρόμοιο τρόπο με το PERO (input -output files). Έτσι συνοπτικά μπορεί να ειπωθεί ότι ως inputs εισάγονται ωριαίες τιμές:

-σχετικής υγρασίας (%) RF,

-παγκόσμιας ακτινοβολίας ( $W/m^2$ ) RG,

-βροχόπτωσης (mm) RR,

-θερμοκρασίας ( $^{\circ}C$ ) TL,

-ταχύτητας ανέμου στα 10 μέτρα (m/s) VV,

-μεγάλου μήκους κύματος ακτινοβολίας ( $W/m^2$ ) LG

-νεφοκάλυψη (octas) NG.

Ως outputs παίρνεται για κάθε ιουλιανή ημέρα (JD) και για τις ώρες από 0 έως 23 ο δείκτης διαβροχής των φύλλων [WET(h)] που παίρνει τιμές 0= στεγνό, 1= υγρό, 2= υγρό σε διάρκεια βροχόπτωσης, 3= σταγόνες σε εξάτμιση.

• **Πρακτική εφαρμογή του PERO.** Με στοιχεία που δόθηκαν από το εργαστήριο Αγρομετεωρολογίας του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας (ωριαίες τιμές υγρασίας και θερμοκρασίας) δημιουργήθηκαν τα input αρχεία RF, TL, ενώ για το METD αρχείο input, καθώς και για την διαβροχή των φύλλων χρησιμοποιήθηκαν τα υπάρχοντα δεδομένα του DEMO του προγράμματος.

Μετά το τρέξιμο του PERO\_ENG βρέθηκε ότι η έναρξη της μόλυνσης θα πραγματοποιηθεί στις 6 Μαΐου και το τέλος της θα είναι στις 30 Μαΐου όταν θα υπάρχουν πλέον ορατές οι πρώτες κηλίδες ελαίου. Επίσης, έγινε γνωστό ότι για όλη την περίοδο που έγινε ο υπολογισμός των στοιχείων θα υπάρχει μόνο ένας κύκλος της ασθένειας του περουνοσπόρου και μάλιστα η ποσότητα της ασθένειας θα είναι πολύ κάτω από τα όρια κινδύνου για εφαρμογή φυτοπροστατευτικών μέσων.

#### 5.5.4 AFRC το φαινολογικό υπομοντέλο σιταριού.

Στο υπομοντέλο αυτό δίνονται δεδομένα σποράς, γεωγραφικό πλάτος θέσεως και ημερήσια μέγιστη και ελάχιστη θερμοκρασία. Ο θερμικός χρόνος δεν υπολογίζεται σαν μια απλή μέση θερμοκρασία αλλά είναι το άθροισμα 8 ημερήσιων παραγόντων παραλλακτικότητας μεταξύ των παρατηρούμενων μέγιστων και ελάχιστων θερμοκρασιών. Ο θερμικός χρόνος υπολογίζεται ως ένας συνδυασμός ημερολογιακού χρόνου, θερμοκρασίας και φωτοπεριόδου και η διαδικασία υπολογισμού διαφέρει για την κάθε φάση.



Ο ρυθμός της διαδικασίας από το ένα στάδιο στο άλλο (i) είναι το προϊόν από τις εξισώσεις της θερμοκρασίας, φωτοπεριόδου και της εαρινοποίησης:

$$f = g(T) \cdot h(P) \cdot i(V) \quad (5-79)$$

όπου T είναι η θερμοκρασία, P η φωτοπερίοδος και V ο παράγοντας εαρινοποίησης. Αν η ανάπτυξη εξαρτάται μόνο από τη θερμοκρασία τότε  $h=i=1$ . Για  $T > T_b$  τότε η εξίσωση  $g(T)$  μπορεί να γραφεί ως

$$g(T) = m (T - T_b) \quad (5-80)$$

όπου m είναι ο αντίστροφος του θερμικού χρόνου μεταξύ δύο σταδίων. Οι επιδράσεις της φωτοπεριόδου βασίζονται πάνω σε αριθμό από ώρες επιδράσεων υπολογιζόμενες για κάθε ημέρα. Ο θερμικός χρόνος μειώνεται από ένα παράγοντα ανάλογο της διαφοράς μεταξύ ενός βέλτιστου και ενός βασικού αριθμού από ώρες επιδράσεων. Ο φωτοπεριοδικός παράγοντας παρουσιάζεται επίσης από μια συνεχή μεταβλητή μεταξύ του 0 και 1. Η αύξηση του φωτο-θερμικού χρόνου υπολογίζεται πολλαπλασιάζοντας την εξίσωση της θερμοκρασίας και του παράγοντα φωτοπεριόδου  $h(P)$ :

$$\begin{aligned} h(P) &= 0 & \text{if } P < P_b \\ h(P) &= (P - P_b) / (P_{opt} - P_b) & \text{if } P_b < P < P_{opt} \\ h(P) &= 1 & \text{if } P > P_{opt} \end{aligned}$$

όπου  $P_{opt}$  είναι μία βέλτιστη φωτοπερίοδος πάνω από την οποία η ανάπτυξη δεν είναι ευαίσθητη στη φωτοπερίοδο, το  $P_b$  ορίζεται στις 0 ώρες από τη φάση του φυτρώματος έως τη διπλή κορυφή και 7 ώρες από τη διπλή κορυφή έως την άνθηση. Ο φωτοπεριοδικός παράγοντας ορίζεται ως 1 κατά τη διάρκεια της ωρίμανσης.

Η κατάσταση της εαρινοποίησης παρουσιάζεται σαν μια συνεχής μεταβλητή με τιμές μεταξύ του 0 (όχι εαρινοποίηση) και του 1 (πρώιμα φυτά). Η επίδραση της θερμοκρασίας  $V_{eff}$  στην εαρινοποίηση δίνεται από μία καμπύλη θερμοκρασίας-εαρινοποίησης της οποίας τα χαρακτηριστικά εξαρτώνται από την ευαισθησία των φυτών στην εαρινοποίηση :

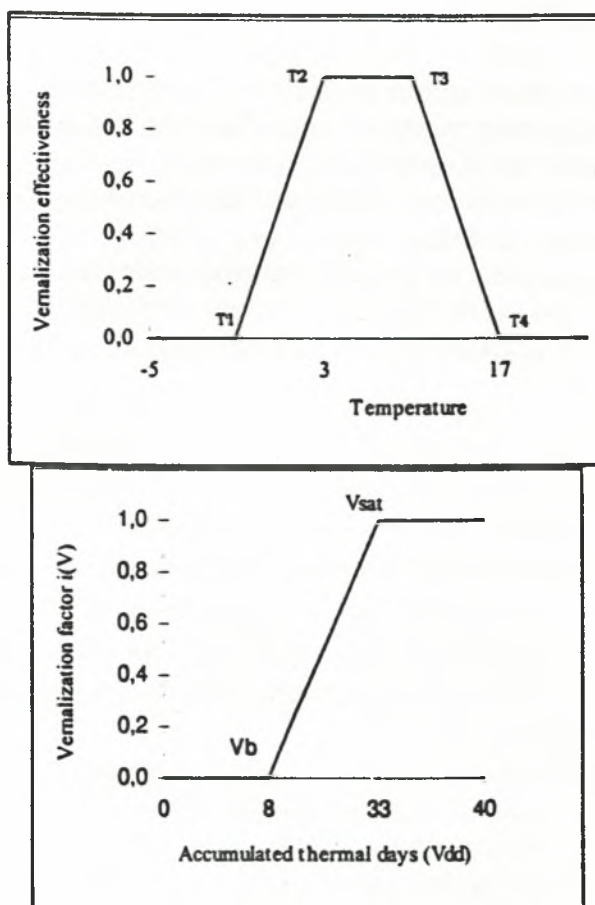
$$\begin{aligned} V_{eff} &= 1 & \text{if } T_2 < T < T_3 \\ V_{eff} &= (T - T_1) / (T_2 - T_1) & \text{if } T_1 < T < T_2 \\ V_{eff} &= (T_4 - T) / (T_4 - T_3) & \text{if } T_3 < T < T_4 \end{aligned}$$

Τιμές των  $T_1$ ,  $T_2$ ,  $T_3$  και  $T_4$  είναι  $-40^\circ\text{C}$ ,  $3^\circ\text{C}$ ,  $10^\circ\text{C}$  και  $17^\circ\text{C}$ .

Η μέση τιμή του  $V_{eff}$  υπολογίζεται για κάθε ημέρα παίρνοντας υπόψη την ημιτονοειδής εξέλιξη της θερμοκρασίας και τις συσσωρευμένες ημερήσιες τιμές του  $V_{dd}$  από την σπορά. Ο κανονικοποιημένος παράγοντας εαρινοποίησης  $i(v)$  προσδιορίζεται ως εξής:

$$\begin{aligned} i(v) &= 0 & \text{if } V_{dd} < V_b \\ i(v) &= (V_{dd} - V_b) / (V_{sat} - V_b) & \text{if } V_b < V_{dd} < V_{sat} \\ i(v) &= 1 & \text{if } V_{dd} > V_{sat} \end{aligned}$$

Στην αρχική έκδοση του μοντέλου AFRC, ο θερμικός χρόνος κατά το φύτευμα ήταν 148 ημεροβαθμοί. Κατά τη διάρκεια της περιόδου μεταξύ του φυτρώματος και της διπλής κορυφής ήταν στους 248 ημεροβαθμούς. Στους 600 ημεροβαθμούς ήταν μεταξύ της διπλής κορυφής και της άνθησης και 350 ημεροβαθμοί μεταξύ άνθησης και ωριμότητας.



**Σχήμα 5.27** Η επίδραση της θερμοκρασίας και του παράγοντα εαρινοποίησης στην διαδικασία εαρινοποίησης.

### 5.5.5. SUCROS

Η αναπτυξιακή διαδικασία στο SUCROS πολύ στενά μοιάζει με αυτήν των ημεροβαθμών που περιγράφηκε προηγουμένως. Στην αρχική του έκδοση ο ρυθμός ανάπτυξης υποτίθεται ότι παράγεται από εξισώσεις της θερμοκρασίας και της φωτοπεριόδου. Με άλλες επιτυχής εκδόσεις του, το μοντέλο γίνεται κατάλληλο για ποικίλες καλλιέργειες όπως για χειμερινά σιτηρά, ανοιξιιάτικα σιτηρά, ελαιοκράμβη, ζαχαρότευτλα και σόγια. Οι διαφορές μεταξύ των μοντέλων είναι στη χρήση ποικίλων ισοζυγίων νερού και ειδικούς της καλλιέργειας παραμέτρους.

Στο υπομοντέλο ανάπτυξης, η φαινολογική βαθμίδα εύκολα εκφράζεται με αριθμούς από το 0 έως το 2. Η τιμή 0 είναι για το φύτευμα, η 1 είναι για την άνθηση και το 2 για την ωριμότητα. Ενδιάμεσα αναπτυξιακά στάδια μπορούν να προστεθούν με ολοκλήρωση του ρυθμού ανάπτυξης μέχρι μια συγκεκριμένη τιμή.

Το μοντέλο κανονικά αρχίζει με το φύτευμα αλλά σε πρόσφατες εκδόσεις του, η ημέρα του φυτρώματος μπορεί να καθοριστεί από το μοντέλο αυτό με μία εξίσωση από την ημέρα σποράς και το άθροισμα της ημερήσιας επίδρασης της θερμοκρασίας. Μια εξίσωση γραμμικής συμμεταβολής χρησιμοποιείται για να σχετίσει το ρυθμό του φυτρώματος ( $dEmerg$ ) με τη μέση ημερήσια θερμοκρασία:

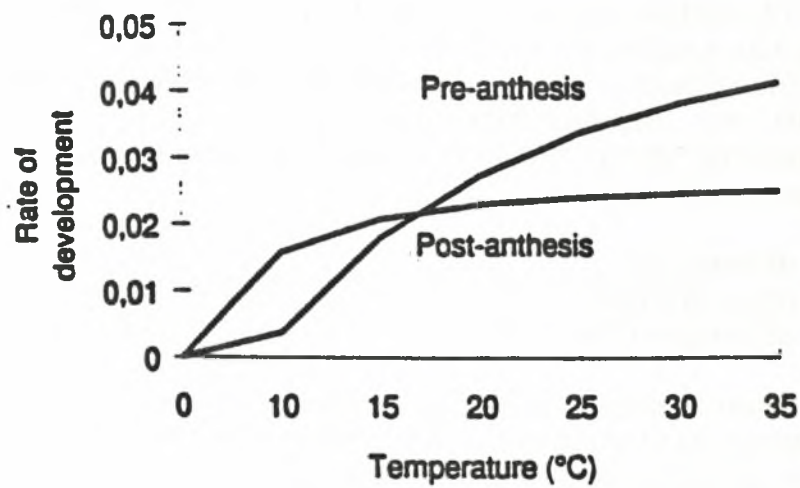
$$\begin{array}{ll} dEmerg = 0 & \text{if } T \leq 0 \\ dEmerg = m_l T & \text{if } 0 < T < T_b \\ dEmerg = m_l T_b + m_z (T - T_b) & \text{if } T \geq T_b \end{array}$$

όπου  $T$  είναι η μέση θερμοκρασία του αέρα,  $T_b$  είναι η βασική θερμοκρασία για το φύτευμα,  $m_l$  και  $m_z$  είναι οι παράγοντες συμμεταβολής. Η ημέρα του φυτρώματος βρίσκεται όταν το ολοκλήρωμα του  $dEmerg$  γίνει 1.

Στην προσομοίωση της ανάπτυξης των φυτρωμένων φυτών, η επίδραση του αυξημένου αθροίσματος της θερμοκρασίας χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό του ρυθμού ανάπτυξης. Ο ρυθμός ανάπτυξης συμπεραίνεται από τη γραμμική παρεμβολή ( σχήμα 5.36 ).

Οι τρόποι υπολογισμού των επιδράσεων της φωτοπεριόδου και της εαρινοποίησης είναι σχεδόν όμοιοι με αυτούς στο μοντέλο AFRC. Ο ρυθμός ανάπτυξης μειώνεται με τον πολλαπλασιασμό της εξίσωσης της θερμοκρασίας με ένα παράγοντα ο οποίος παίρνει τιμές μεταξύ 0 και 1. Μετά την άνθηση μόνο η θερμοκρασία επιδρά στον ρυθμό ανάπτυξης. Για τη φωτοπερίοδο, ο παράγοντας συμπεραίνεται από πίνακα παρόμοιο με αυτών της θερμοκρασίας ή είναι απλό ανάλογο του μήκους ημέρας διαιρεμένο με το 24.

Ο ρυθμός εαρινοποίησης και ο παράγοντας εαρινοποίησης υπολογίζονται από ένα σύμπλοκο εξισώσεων που η γενική τους μορφή είναι η ίδια σαν αυτήν που περιγράφηκε για το μοντέλο AFRC.



**Σχήμα 5.28** Σχέση μεταξύ ρυθμού ανάπτυξης και θερμοκρασίας κατά την διάρκεια και πριν το στάδιο της άνθησης στο SUCROS



### 5.5.6. CERES

Οι φάσεις ανάπτυξης στο CERES οργανώθηκαν στα στάδια της αύξησης πριν την σπορά ή σπορά έως το στάδιο της ωρίμανσης. Αυτά τα αυξητικά στάδια παίρνουν αριθμούς από το 1 έως το 9. Τα στάδια από το 1 έως το 6 είναι τα ενεργά πάνω από το έδαφος στάδια, το 7(αγρανάπαυση ή πριν τη σπορά) χρησιμοποιείται για την μοντελοποίηση του ισοζυγίου του νερού κατά τη διάρκεια της αδρανούς περιόδου και για την εκτίμηση των συνθηκών νερού κατά τη σπορά. Το στάδιο 8 είναι από τη σπορά έως τη βλάστηση και το στάδιο 9 είναι η περίοδος από τη βλάστηση έως το φύτευμα του σπόρου.

Η διαδικασία των διαφορετικών αναπτυξιακών σταδίων πραγματοποιείται από τη συσσώρευση των θερμικών χρονικών μονάδων (DDT) οι οποίες είναι τελικά τροποποιήσεις της εαρινοποίησης και της φωτοπερίοδου κατά τη διάρκεια από το φύτευμα μέχρι την έναρξη της άνθησης. Οι ημερήσιες χρονικές θερμικές μονάδες υπολογίζονται από τις παρατηρούμενες ελάχιστες και μέγιστες θερμοκρασίες αέρα με θερμοκρασία βάσης τους  $0^{\circ}\text{C}$  για τα στάδια από το 1 μέχρι το 4,  $1^{\circ}\text{C}$  για τα στάδια από το 5 έως το 8 και  $2^{\circ}\text{C}$  για το στάδιο 9.

Όταν οι θερμοκρασίες του αέρα είναι μικρότερες του  $0^{\circ}\text{C}$  ένας παράγοντας διορθωτικός λαμβάνει μέρος για να υπολογιστεί η διαφορά μεταξύ της κορυφής των φυτών και της θερμοκρασίας του αέρα. Το ύψος του χιονιού επίσης τροποποιεί τη θερμοκρασία της κορυφής κατά τη διάρκεια των παγωμένων περιόδων. Επομένως ο ρυθμός ανάπτυξης είναι άμεσα ανάλογος με τη θερμοκρασία στο εύρος της βασικής θερμοκρασίας και των  $26^{\circ}\text{C}$ .

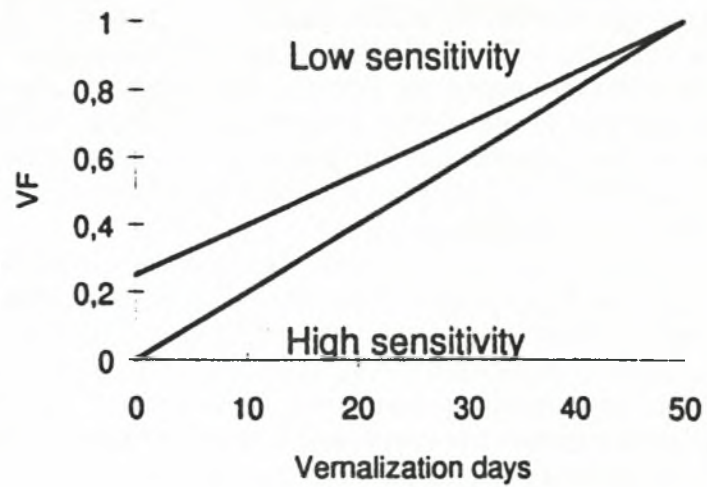
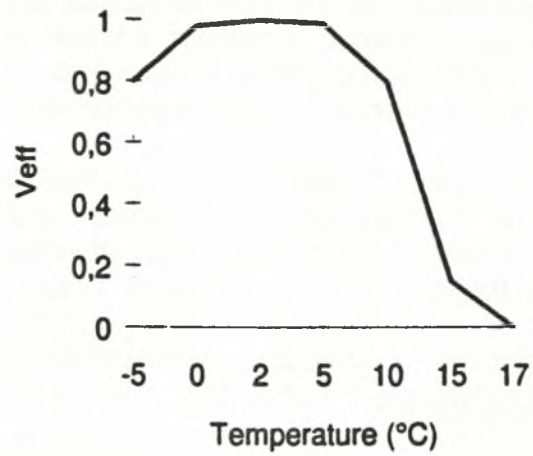
Μεταξύ των  $26$  και  $34^{\circ}\text{C}$  η ημερήσια συμβολή του θερμικού χρόνου καθορίζεται σε ένα μέγιστο των 26 βαθμών. Για μέγιστη θερμοκρασία αέρα μεγαλύτερη των  $34^{\circ}\text{C}$  η ημερήσια συμβολή προοδευτικά μειώνεται μέχρι την τιμή του μηδενός στους  $60^{\circ}\text{C}$ .

Η εαρινοποίηση υποτίθεται ότι δεν εμφανίζεται κατά τη διάρκεια του σταδίου 9 και 1 για θερμοκρασία κάτω από  $0^{\circ}\text{C}$  ή πάνω από  $15^{\circ}\text{C}$  ή  $17^{\circ}\text{C}$ , το βέλτιστο παρατηρείται στο εύρος από  $0^{\circ}\text{C}$  έως  $7^{\circ}\text{C}$ . Οι ελάχιστες και οι μέγιστες ημερήσιες θερμοκρασίες χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό της επίδρασης του παράγοντα της ημερήσιας εαρινοποίησης ( $V_{eff}$ ) με τιμή μεταξύ 0 και 1. Το γενικό σχήμα της καμπύλης της εαρινοποίησης είναι παρόμοια με αυτή που περιγράφηκε για το μοντέλο του σιταριού ARFC. Η εαρινοποίηση ολοκληρώνεται όταν το  $V_{dd}$ , το άθροισμα της ημερήσιας  $V_{eff}$ , είναι ίσο με το 50 (σχήμα 5.29).

$$VF = 1 - PIV * (50 - V_{dd}) \quad (5-81)$$

Η γενετική ευαισθησία της καλλιέργειας στην εαρινοποίηση ελέγχεται από την παράμετρο PIV. Σε μερικές περιπτώσεις μη εαρινοποίηση μπορεί να υπάρξει όταν τα φυτά εκτεθούν σε υψηλές θερμοκρασίες. Αν το  $V_{dd0}$  είναι μικρότερο από 10 και η μέγιστη θερμοκρασία αέρα είναι μεγαλύτερη από  $30^{\circ}\text{C}$ , ο αριθμός των ημερών εαρινοποίησης διορθώνεται με την παρακάτω τιμή

$$V_{dd} = V_{dd0} - (0,5 (T_{max} - 30)) \quad (5-82)$$



**Σχήμα 5.29** Η επίδραση της θερμοκρασίας και του παράγοντα εαρινοποίησης στο μοντέλο CERES.

Στο CERES θεωρείται ότι τα μήκη ημέρας μικρότερα από 20 ώρες μπορεί να καθυστερήσουν την ανάπτυξη της καλλιέργειας. Ο παράγοντας της φωτοπεριόδου PF υπολογίζεται από τον τύπο

$$PF = 1 - PID (20 - P)$$

$$(5-83)$$

όπου ο PID είναι άλλος ένας γενετικός συντελεστής για την ευαισθησία της καλλιέργειας στη φωτοπερίοδο. Υψηλές τιμές του PID δείχνουν μια αυξημένη ευαισθησία στη μεγάλη φωτοπερίοδο. Τότε η ελάχιστη τιμή της εαρινοποίησης (VF) ή του παράγοντα της φωτοπεριόδου (PF) πολλαπλασιάζεται με το θερμικό χρόνο ώστε να μειωθεί η βασική υπολογιζόμενη τιμή.

Στο μοντέλο CERES η βλάστηση υποθέτεται ότι εμφανίζεται μια μέρα μετά από τη σπορά και η διάρκεια του σταδίου 9 επηρεάζεται από το βάθος σποράς. Η βλαστική ανάπτυξη του σιταριού ελέγχεται από την έννοια της φυλλοχρονικής παύσης (PHINT) η οποία είναι η χρονική παύση (σε ημεροβαθμούς) μεταξύ της εμφάνισης των δύο φύλλων. Παρά την αμφισβήτηση σε αυτό το θέμα, η φυλλοχρονική παύση υποτίθεται ότι είναι σταθερή (στα χειμερινά σιτηρά έχει PHINT 100 ημεροβαθμών ενώ στα ανοιξιάτικα σιτηρά είναι 75 ημεροβαθμοί). Η διάρκεια της φάσης από 1 έως 3 (πίνακας 5.7) εκφράζεται σαν μια εξίσωση του PHINT.

Το στάδιο 4 παίρνει μια σταθερή τιμή ημεροβαθμών (200). Ο θερμικός χρόνος για το στάδιο 5 ποικίλει μεταξύ των γενοτύπων και προσδιορίζεται από ένα γενετικό συντελεστή της καλλιέργειας (P5) του οποίου η τιμή είναι μεταξύ 2,5 και 3,5 για τα ανοιξιάτικα σιτηρά και μεταξύ 2,0 και 2,5 για τα χειμερινά σιτηρά.

**Πίνακας 5.7** Βλαστική ανάπτυξη των σταδίων στο CERES.

Number	Growth stages	Duration (degree days)
1	Emergence to floral initiation	400 PHINT/95
2	Floral initiation to beginning of ear growth	3 PHINT
3	Begin of ear growth to anthesis	2 PHINT
4	Anthesis to beginning of grain fill	200
5	Grain filling period	$430 + P5 \cdot 20$
6	Maturity	-
7	Fallow or presowing	-
8	Sowing to germination	1 day
9	Germination to emergence	$40 + 10.2 \text{ DEPTH}$

### 5.5.7 Τα μοντέλα Baier, Williams, Warrick – Gardner, Duchan, Hanks – Hubbard, και το μοντέλο Ξηρής Ύλης.

#### Μοντέλο BAIER (1973)

$$Y = \sum_{t=0}^{t=m} V_1 \times V_2 \times V_3$$

όπου  $Y$  = αγροτική σοδειά

$V_1, V_2, V_3$  = συναρτήσεις ανεξαρτήτων μεταβλητών

$$V = (u_1 t + u_2 t^2 + u_3 t^3 + u_4 t^4) + (u_5 t + u_6 t^2 + u_7 t^3 + u_8 t^4)X + (u_9 t + u_{10} t^2 + u_{11} t^3 + u_{12} t^4)X^2 \quad (5-84)$$

#### Μεταβλητές

1. ενέργεια
2. θερμοκρασία
3. υγρασία εδάφους ή εξατμισοδιαπνοή.

#### Μοντέλο Williams (1969)

$$\begin{aligned} Y_{ij} = & a_0 + a_1 (ij + a_2 C_{ij}^2 + a_3 R_{6ij} E_{7ij} + a_4 R_{5ij} E + \\ & + a_5 R_{6ij} R_{7ij} + a_6 R_{5ij} R_{7ij} + a_7 C_{ij} R_{7ij} \\ & + a_8 R_{5ij} R_{6ij} + a_9 C_{ij} R_{6ij} + \\ & + \sum_{m=5}^7 (b_{m1} R_{mij} + b_{m2} E_{mij} + b_{m3} R_{mij} + b_{m4} E_{mij} + b_{ms} R_{mij} E_{mij}) \end{aligned}$$

όπου  $Y_{ij}$  = σοδειά σιταριού τον  $j$ th χρόνο

$C_{ij}$  = υετός περιόδου 21 μηνών,

$R_{5ij}, R_{6ij}, R_{7ij}$  = υετός

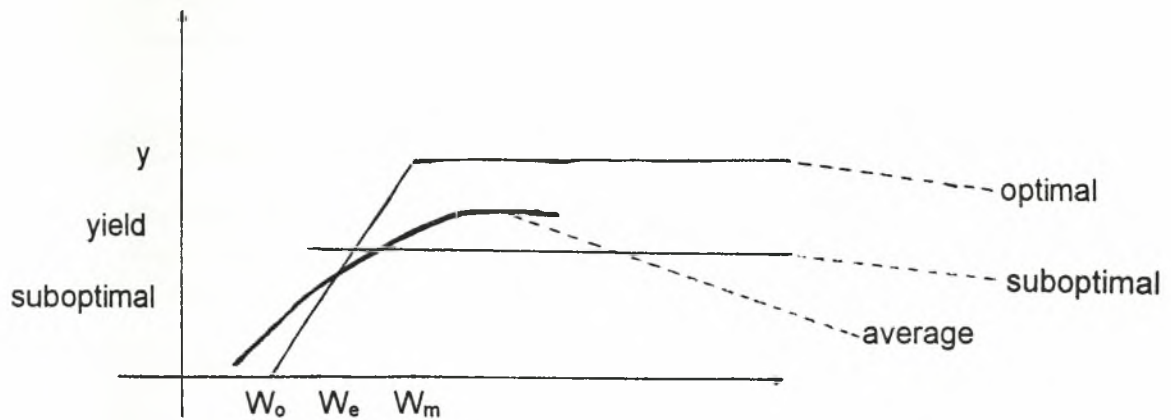
#### Μοντέλο Warrick – Gardner (1983)

Με έμφαση: έδαφος – άρδευση

$$\bar{y} = \int_{w_0}^{\infty} dw \int_{w_0}^t yf(w, w_e) dw_e$$



$f(w, w_e) = \text{jrd εποχιακού διαθέσιμου νερού } w, \text{ max αποτελεσματικά διαθέσιμου νερού } w_e.$



### Μοντέλο Duchan (1986)

Τροποποίηση του CERES – Maize  
 Πρόγνωση μετεωρολογικών παραμέτρων  
 Μέθοδος Παλινδρόμησης (Regression)  
 Πρόγνωση 30 ημερών

### Hanks – Hubbard Μοντέλο (1974, 1983)

$$P_c = \frac{fTr}{Etp}$$

$P_c$  = ξηρή ύλη

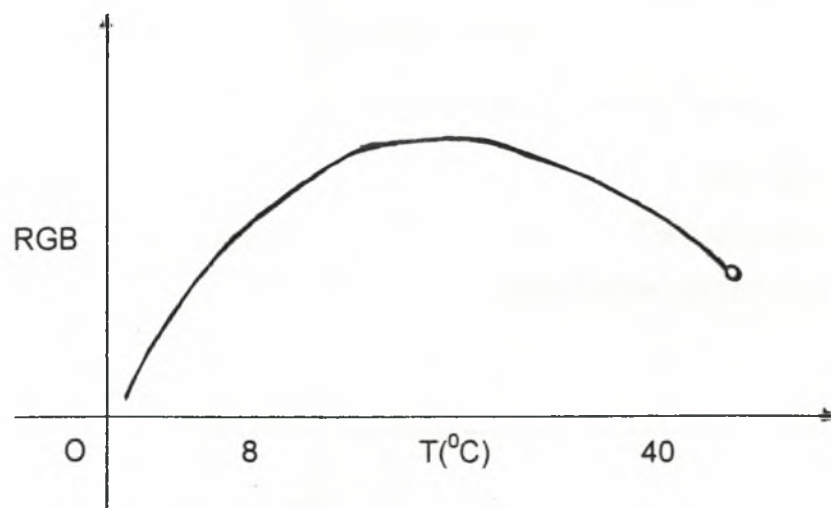
$E_{tp}$  = δυναμική ΕΤ

$f$  = συντελεστής καλλιέργειας

αρχικά

$$\frac{Y}{Y_p} = \frac{Tr}{Trp}$$

$$Y = a + b \frac{\sum_{i=1}^K \lambda_i T r_i}{\sum_{i=1}^K \lambda_i T r_{pi}}$$



$$G = \Sigma RGR (\theta)$$

Όπου G = ανάπτυξη ή φαινολογική πρόοδος

### Μοντέλο Ξηρής Ύλης (Hodges – Kanemasu)

- Φωτοσύνθεση
  - Αναπνοή (Respiration)
- Συσσώρευση Ξηρής Ύλης (Dry Matter Accumulation)

$$\text{Soil Respiration} = -7,2 - 1,15 (T_{MAX} + Z_{TMIN})$$

(νύχτα)

$$\text{Soil Respiration} = -15,11 - 0,65 (2T_{MAX} + PT_{MIN})$$

$$1 \text{ PAR} = 0,5739 \text{ PAR} \cdot \text{LAI}^{0,3296}$$

$$\text{PAR} = 9,07 \text{ SR}$$

Emergence to jointing

$$\text{GP} = K_s [ 415 - 434 \exp (-0,000276 \times \text{IPA}) ]$$

Jointing to maturity

$$\text{GP} = K_s [ 1,047 - 865 \exp (-0,0001326 \times \text{IPA}) ]$$

$$\text{TNCE} = \text{GP} + \text{DResp} + \text{NResp}$$

$$\text{DMP} = 0,0067 \text{ TNCE}$$

### LAI από τον LANDSAT

$$\text{TVI} = [(\text{MSS7} - \text{MSS5}) / (\text{MSS7} + \text{MSS5}) + 0,5]^{1/2}$$

$$\text{PVI} = [(\text{Rgg5} - \text{Rp5})^2 + (\text{Rgg7} - \text{Rp7})^2]^{1/2}$$

$$\text{Green GVI} = -0,290 \text{ MSS4} - 0,562 \text{ MSS5} + 0,600 \text{ MSS6} + 0,491 \text{ MSS7}$$

$$\text{LAI} = -0,291 + 0,147 (\text{PVI})$$

## 5.6 Βιβλιογραφία Κεφαλαίου 5

1. Amores-Vergara, E., 1973 : A study of the effectiveness of four mathematical models on the development of sweet corn (H801) and the daily variations of solar radiation and air temperature. Thesis, University of the Philippines. 169 pp.
2. Arnold, C. Y., 1959: The determination and significance of the base temperature in a linear heat unit system. *Proc. Amer. Soc. Hort. Sci.*, 14:430-445.
3. Arnold, C.Y. 1960: Maximum – minimum temperature as a basis for computing heat units. *Proc. American. Soc. Hort. Sci.* 76: 682-692.
4. Aspiazu, C. and Shaw, R. H., 1972: Comparison of several methods of growing-degree-unit calculations for corn (*Zea mays* L.). *Iowa State J. Sci.*, 46:435-442.
5. Asrar J.K, Hipps L.E., and Kanemasu E.T.,1984: Estimating absorbed photosynthetic radiation and leaf area index from spectral reflectance in wheat. *Agron. J.*, 76 : 300-306.
6. Asrar G., Kanemasu E.T., Jackson R.D., and Pinter, J.,1985: Estimation of total above-ground phytomass production using remotely sensed data. *Remote Sensing of Environment*,17 : 211-220.
7. Asrar G., Kanemasu E.T., Miller G.P., and Weiser R.L.,1986: Light interception and Leaf Area estimates from measurements of grass canopy reflectance, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 24 (1) : 76-81.
8. Baier, W. and Robertson, G. W., 1966: A new versatile soil moisture budget. *Can. J. Plant Sci.*, 46:299-315.
9. Baron, V., Shaykewich, C. F. and Hamilton, R. I., 1975: Relation of corn maturity to climatic parameters. *Can. J. Soil Soc.*, 55:343-348.
10. Bassett, I. J., Holmes, R. M. and MacKay, K. H., 1961: Phenology of several plant species in Ottawa, Ontario and an examination of the influence of air temperature. *Can. J. Plant Sci.*, 41:643-652.
11. Becker, F. and Z.L. Li 1990a: Towards a local split window method over land surfaces, *Int. J. Remote Sens.* 3: 369-393
12. Becker, F. and Z.-L. Li 1990b: Temperature-independent spectral indices in thermal infrared bands, *Remote Sens. Environ.* 32: 17-33
13. Blackburn, W. J., Proctor, J. T. A. and Gillespie, T. J., 1982: Using degreedays to predict the occurrence of apple scab infection. Sixteenth Annual Congress, Canadian Meteorological and Oceanographic Society, Ottawa. Abstract in *Atmosphere-Ocean*, 20:35.
14. Boissezon de H., Gonzales G., and Pous B.,1993: Rapid estimates of crop acreage and production at a European scale using high resolution imagery-Operational review. International Symposium of Operationalization of Remote Sensing,19-23 April 1993, ITC Enschede, Netherlands.12 pp.
15. Brown, D. M., 1960: Soybean ecology I : Development-temperature relationships from controlled environmental studies. *Agronomy J.*, 52:493-496.
16. Brown, D. M., 1963: A heat-unit system for corn hybrid recommendations. 11 pp. in *Proc. of the 5th Conf. Agri. Meteorol.*, Lakeland, Florida.



17. Brown, D. M., 1978: Heat units for corn in Southern Ontario. Ontario Ministry of Agriculture and Food, Factsheet No. 78-063. 4 pp.
18. Brown, D. M., and Chapman, L. J., 1960: Soybean ecology II: Development-temperature-moisture relationship from field studies. *Agron. J.*, 52:496-499.
19. Brown, D. M., and Chapman, L. J., 1961: Soybean ecology III: Development units for zones and varieties in the Great Lakes Region. *Agronomy J.*, 53:306-308.
20. Bunting, E. S., 1976: Accumulated temperature and maize development in England. *J. Agric. Sci. Camb.*, 87:577-583.
21. Caprio, J. M., 1971a: The Solar-Thermal Unit theory in relation to plant development and potential evapotranspiration. Montana Agricultural Experiment Station, Montana State University, Bozeman. Cir. 251. 10 pp.
22. Caprio, J. M., 1971b: Number of accumulated Solar-Thermal Units associated with the time when various plant species begin to bloom. Plant and Soil Science Department, Montana Agricultural Experiment Station, Bozeman. Pamphlet. 1 p.
23. Caprio, J. M., 1974. Solar-Thermal Unit concept in problems related to plant development and potential evapotranspiration. Pp. 353-364 in *Phenology and Seasonally Modelling. Ecological Studies 8* (Ed. Helmut Lieth), Springer-Verlag, New York. 444 pp.
24. Che, W. and Price, J.C. 1992: Survey of radiometric calibration results and methods for visible and near infrared channels of NOAA-7,-9 and 11 AVHRRS, *Remote Sens. Environ* 41: 19-27
25. Clarkson, N. M. and Russell, J. S., 1976: Effect of water stress on the phasic development of annual Medicago species. *Aust. J. Agric. Res.*, 21:227-234.
26. Charles-Edwards D.A.,1984: Physiological determinants of crop growth, Academic Press (Eds.) :140 p.
27. Clarkson, N. M. and Russell, J. S., 1979: Effect of temperature on the development of two annual medics. *Aust. J. Agric. Res.*, 30: 909-916.
28. Coligado, M. C. and Brown, D. M., 1975a: Response of corn (*Zea Mays* L.) in the pre-tassel initiation period to temperature and photoperiod. *Agri. Meteorol.* 14:351-367.
29. Coligado, M. C. and Brown, D. M., 1975b: A biophotothermal model to predict tassel-initiation time in corn (*Zea Mays* L.) *Aqri: Meteorol.* 15:11-31.
30. Coulson K.L., and Reynolds D.W.,1971: The spectral reflectance of natural surfaces, *Journal of Applied Meteorology*,10 :1285-1295.
31. Cross, H. Z. and Zuber. M. S., 1912: Prediction of flowering dates in maize based on different methods of estimating thermal units. *Agronomy J.*, 64:351-355.
32. Dalezios N. R. 1996: An overview of resent developments and applications in crop monitoring and yield assessment. International Symposium on Applied Agrometeorology and Agroclimatology. Volos 1996.
33. Dalezios N. R., Stamatopoulou I. 1996: The significance of meteorological indices in the phenology of maize in central Greece. International Symposium on Applied Agrometeorology and Agroclimatology. Volos 1996.

34. Dalezios N. R., Zarpas C.D. 1996: The role of NDVI and meteorological indices in the phenology of cotton in central Greece. International Symposium on Applied Agrometeorology and Agroclimatology. Volos 1996.
35. Δαλέζιος Ν. Ρ. 2000: Σημειώσεις Αγρομετεωρολογίας, πανεπιστημιακές παραδόσεις. Βόλος 2000.
36. Dedieu G., Deschamps P.Y., Kerr Y.H., and Raberanto P., 1987: A global survey of surface climate parameters from satellite observations : Preliminary results over Africa, *Adv. Space Res.*, 11:129-137.
37. Dedieu, G, Deschamps, P.Y. and Kerr, Y.H, 1987: Satellite estimation of solar radiance at the surface of the Earth and of surface albedo using a physical model applied to Meteosat data, *J. Clim. Appl. Meteorol.*, 26, 79-87.
38. Dedieu, G. 1990: Land surface reflectances and vegetation index derived from NOAA/AVHRR, in Workshop on the "Use of Satellite-Derived Vegetation Indices in Weather and Climate Prediction Models", Camp Springs, MD 26-27. Feb 1990, NOAA Technical Report pp 114
39. Deering, D.W., and Eck, T.F. 1987: Atmospheric optical depth effects on annual anisotropy of plant canopy reflectance, *Int. J. Remote Sens.*, 8(6), 896-916.
40. Delecalle R., Baret F., Guerif M., and Maas S.J., 1991: L'utilisation conjointe de la teledetection et des modeles d'estimation des productions agricoles : tendances actuelles. Proceedings of the 5th International Colloquium Physical Measurements and Signatures in Remote Sensing, Courchevel, France, 14-18 January 1991: 529-534.
41. Diallo O., Diouf A., Hanan N.P., Ndiaye A., and Prevost Y., 1991: AVHRR monitoring of savanna primary production in Senegal, West Africa : 1987-1988, *Int. J. Remote Sens.*, 12 (6) :1259-1280.
42. Diepen C. A. Van, Wolf J., van Keulen H. R, 1989: WOFOST : a simulation model for crop production. *Soil use management* 5:16-24.
43. Dmitrenko VP 1976: Assessment of impact of air temperature Omitrenko and precipitation on yield formation of major cereal crops. Guidebook. Hydrometeoizdat, Leningrad, 48 pp.
44. Edey, S. N., 1969: Whether to have or not to have the tulip festival. *Greenhouse-Garden-Grass*, 8:1-3. Plant Research Institute, Agriculture Canada.
45. Edey, S. N., 1977: Growing degree-days and crop production in Canada. Pub. No. 1635, Agriculture Canada. 63 pp.
46. Engman, E.T. and Gurney, R.J. 1991: Remote Sensing in Hydrology, Chapman and Hall: 275, London
47. Faivre R., Goffinet B, and Wallash D., 1991: Utilisation de donnees intermediaires pour corriger la prediction de modeles mecanistes. *Biometrics*. 47 (1) :1-12.
48. Fassnacht, K.S., S.T. Gower, J.M, Norman and R.E. McMurtrie, 1994, A comparison of optical and direct methods for estimating foliage surface area index in forests, *Agric. For. Meteorol.*, 71, 183-207
49. Foong, S. F., 1980: Weather-based model for estimating oil palm fruit bunch yield. University of Guelph, M.Sc. Thesis.
50. Franquin, P., 1968: Determination of the climatic equations of development in short-day cultivated species: Agronomic significance.

- Agroclimatological methods. Proceedings of the Reading Symposium, pp. 321-330. Unesco, Paris (In French with English summary).
51. Gallo K.P., Daughtry C.S.T., and Bauer M.E., 1985; Spectral estimation of absorbed photosynthetically active radiation in Corn canopies. *Remote Sensing of Environment*, 17 : 221-232.
  52. Gamon J.A., C.B. Field, M.L. Goulden, K.L. Griffin, A.E. Hartley, G. Joel, J. Penuelas, and R. Valentini, 1995, Relationships between NDVI, canopy structure, and photosynthesis in three Californian vegetation types, *Ecological Applications*, 28-41.
  53. Garner, W. W. and Allard, H. A., 1920: Effect of the relative length of day and night and other factors of the environment on growth and development in plants. *J. Agr. Res.*, 18:553-606.
  54. Gautier, C., Diak, G. and Masse, S., 1980: A simple physical model to estimate incident solar radiation at the surface from GOES satellite data, *J. Appl. Meteorol.*, 19, 1005-1012.
  55. Goudriaan J. and van Laar H.H. 1994: Modelling potential crop growth processes. Kluwer Academic Publishers, London, 238 p.
  56. Goyne, P. J., Woodruff, D. R. and Churchett, J. D., 1977: Prediction of flowering in sunflowers. *Aust. J. Exp. Agric. and Animal Hus.*, 11:475-481.
  57. Goward S.N., Dye D., Kerber A., and Kalb V., 1987b: Comparison of north and south american biomes from AVHRR observations, *Geocarto International*, 1: 27-39.
  58. Gozzini B., Orlandini S, Rosa M. 1993: Logiciel du modèle PLASMO. EPPO Bulletin 23, 695-699.
  59. Groten S.M.E., 1993, NDVI – crop monitoring and early yield assessment of Burkina Faso. *Int J. of Remote Sensing*, Vol. 14, No 8, 1495-1515.
  60. Gu X.F., Seguin B., Hanocq J.F., and Guinot J.P., 1994: Evaluation and comparison of atmospheric correction methods for thermal data measured by ERS 1- ATSR, NOAA 11-AVHRR, and Landsat5-TM sensors, 6eme Synposium International de Mesures Physiques et Signatures Spectrales en Teledetection, 17-21 janvier 1994, Val d'Isere, France : 793- 800.
  61. Guerif M., De Brisis S., and Seguin B., 1993: Combined NOAA-AVHRR and SPOT-HRV data for assessing Crop yields of semiarid environments. *EARSel Advances in Remote Sensing*, 2 (2) :110 -123.
  62. Hansen S., Jensen H.E., Nielsen N.E. and Svendsen H. 1990: DAISY: a Soil -Plant-System Model. Danish simulation model for transformation and transport of energy and matter in the soil-plant-atmosphere system. The National Agency for Environmental Projection, Copenhagen.
  63. Hatfield J.L., Asrar G., and Kanemasu E.T., 1984: Intercepted photosynthetically active radiation estimated by spectral reflectance. *Remote Sensing of Environment*, 14 : 65-75.
  64. Hay, I.E. and Hanson, K.J., 1978: A satellite-based methodology for determining solar radiance at the ocean surface during GATE, Abstract of paper presented at the 12 th Conference on Hunicanes and Tropical Meteorology, Bull. Am. Met. Soc., 59, 1549.



65. Holben B.N., Tucker C.J., and Fan C., 1980: Spectral assessment of Soybean Leaf Area and Leaf Biomass, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 46 (5) : 651-656.
66. Holmes, R. M. and Robertson, G. W., 1959: Heat units and crop growth. Publication No. 1042. Department of Agriculture, Ottawa, Canada. 32 pp.
67. Holt, D. A., Bula, R. J., Miles, G. E., Schreiber, M. M. and Peart, R. M., 1975: Environmental physiology, modelling and simulation of alfalfa growth: I. Conceptual development of SIMED. Agricultural Experiment Station, Purdue University, West Lafayette, Indiana. Res. Bull. 901. 26 pp.
68. Idso, S.B., Jackson, R.D. and Reginato, R.J. 1976: Determining remittances for use in infrared thermometry: A simple technique for expanding the utility of existing methods. *J.Appl.Meteor* 15: 16-20
69. Idso, S.B., Jackson, R.D. and Reginato, R.J. 1977: An equation for potential evaporation from soil, water and crop surfaces adaptable to use by remote sensing, *Geophys.Res.Lett.* 4: 187-188
70. Idso S.B., Jackson R.D., and Reginato R.J., 1977: Estimation of grain yield by remote sensing of crop senescence rate. *Remote Sensing of Environment*, 9 : 87-91.
71. Jackson R.D., Reginato R.J., and Idso S.B., 1977: Wheat canopy temperature : a practical tool for evaluating water requirements. *Water Ressource. Research.*, 13 (3) : 651-656.
72. Justice C.O., Townshend J.R.G., Holben B.N., and Tucker C.J., 1985: Analysis of the phenology of global vegetation using meteorological satellite data, *Int. J. Remote Sensing*, 6 (8) : 1271-1318.
73. Justice C.O., Holben B.N., and Gwynne M.D., 1986: Monitoring east African vegetation using AVHRR data, *Int. J. Remote Sensing*, 7 ( 11 ) : 1453-1474.
74. Justus, C. G; Paris, M.V. and Tarpley, J.D., 1986: Satellite measured isolation in the United States, Mexico and South America, *Remote Sens. Of Environm.*, 20, 57-83
75. Kerschgens, M., Pilz, U. and Raschke, E., 1978: A modified two-stream approximation for computation of the solar radiation budget in a cloudy atmosphere, *Tellus*, 30, 429-435
76. Keulen H. van 1982: Crop production under semi-arid conditions, as determined by nitrogen and moisture availability. In: F.W.T. Penning de Vries and H.H. van Laar: *Simulation of plant growth and crop production. Simulation Monographs*, Pudoc, Wageningen.
77. Kontturi, M., 1919: The effect of weather on yield and development of spring wheat in Finland. *Annales Agriculturae Fenniae*, 18:263-214.
78. Laar H.H. van, Goudrian J., Keulen H. van (Eds) 1992: Simulation of crop growth for potential and water-limited production situations. *Simulation Report. CABO-TT*, 27, CABO-DLO, Wageningen, 105ñ.
79. Lalluka, U., Rantanen, O. and Mukula, J., 1978: The temperature sum requirement of barley varieties in Finland. *Annales Agriculturae Fenniae*, 11:185-191.
80. Lehenbauer, P. A., 1914: Growth of maize seedlings in relation to temperature *Physiol. Res.*, 1:247-288.



81. Leblon B., H. Granberg, C. Ansseau, and A. Royer, 1993, A semi-empirical model to estimate the biomass production of forest canopies from spectral variables. Part 1: relationship between spectral variables and light interception efficiency, *Remote Sensing Reviews*, 109-125.
82. Lieth H., and Whittaker R.H., 1975: Primary productivity of the biosphere, *Ecological studies* 14, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York : 339p.
83. Lindsey, A. A. and Newman, J. E., 1956: Use of official weather data in springtime temperature analysis of an Indiana phenological record. *Ecology* 3:812-823.
84. Livingston, B. E., 1916: Physiological temperature indices for the study of plant growth in relation to climatic conditions. *Physiol. Res.*, 1:399-420.
85. Loudjani P., 1993: Apport des donnees satellitaires en vue de l'estimation de la production primaire nette à l'échelle regionale : cas de l'Afrique de l'ouest. These de l'Universite Orsay, Paris sud, 151 pp.
86. Lumsden I.A. 1980: The influence of weather on the development of winter wheat. A. Sc. Thesis, University of Bath.
87. Maas S.J., 1988a: Use of remotely-sensed information in agricultural crop growth models. *Ecological Modelling*, 41: 247-268.
88. Maas S.J., 1988b: Using satellite data to improve model estimates of crop yield. *Agron. J.*, 80 : 655-662.
89. MacKenon D.K.L., Waister P.D. ( 1985). A simple model of potato growth and yield, Part 1. *Agricultural and Forest Meteorology* 34(2-3): 241-252,
90. MacKenon D.K.L. ( 1985). A simple model of potato growth and yield, Part II. *Agricultural and Forest Meteorology* 35(4 ): 285-300.
91. MacKenon D.K.L. ( 1992). Agrometeorological aspects of forecasting yields of potato within A. C., Commission of the European Communities, Bryssels-Luxembourg,.
92. Major, D. J., Johnson, D. R. and Luedders, V. D., 1975a: Evaluation of eleven thermal unit methods for predicting soybean development. *Crop Science*, 15:172-114.
93. Major, D. J., Johnson, D. R., Tanner, J. W. and Anderson, I. C. 1975b: Effects of daylength and temperature on soybean development. *Crop Science*, 15:114-119.
94. Meyer-Roux, J. and King, C. 1992: Agriculture and Forestry, *Int.J. Remote Sens.* 13: 6-7, 1873-1341
95. Monteith J.L., 1972: Solar radiation and productivity in tropical ecosystems. *Journal of Applied Ecology*, 9 : 747-766.
96. Moser, W. and Raschke, E., 1983: Mapping of global radiation and of cloudiness from METEOSAT image data, *Meteorol. Rdsch.*, 36, 33-41.
97. Moser, W. and Raschke, E., 1984: Incident solar radiation over Europe estimated from METEOSAT data, *J. Clim. and Appl. Meteorol.*, 23, 166-170.
98. da Mota, F. S., 1978: Soya bean and weather. Tech. Note No. 160, WMO-No. 498, WMO, Geneva. 64 pp.
99. Moulin S., and Fischer A., 1993: Simulation of the temporal variations of NOAA/AVHRR reflectances. Coupling of functional model and satellite data. *Proceedings of the 6th AVHRR users's meeting*, 29th June - 2nd July 1993, Belgirate, Italy : 277 - 283.

100. Newman, J. E., Cooper, W. C., Reuther, W., Cahoon, G. A. and Peynado, A., 1961: Orange fruit maturity and net heat accumulations. Pp. 121-147 in SHAW, R.H. (ed.), *Ground Level Climatology*. The Horn-Shafer Company, Baltimore. Pub. No. 86 of the American Association for the Advancement of Science. 408 pp.
101. Nuttonson, M. Y., 1948: Some preliminary observations of phenological data as a tool in the study of photoperiodic and thermal requirements of various plant material. Vernalization and photoperiodism: A symposium, Waltham, Mass. No. 129-143 in *Chronica Botanica*. (U.S.A.).
102. Orlandini S., Gozzini B., Maracchi G., Rosa M. 1993: PLASMO: un modello per il controllo della peronospora della vite. In: Atti del convegno "Informatica e Agricoltura", a cura di MARACCHI G., FALCHI M. A. 17-18 dicembre 1992, Firenze (Italia), 81-90.
103. Orlandini S., Gozzini B., Maracchi G., Miglietta F., Palchetti C., Rosa M., Seghi L. 1993: Use of simulation models for managing grapevine protection. In: Atti del convegno "Models, computer programs and expert systems for agricultural mechanization". 1-2 ottobre 1993, Firenze (Italia), 287-292.
104. Orlandini S., Gozzini B., Maracchi G., Miglietta F., Palchetti C., Rosa M. Egger E., Storch P. 1993: PLASMO: a simulation model for *Plasmopara viticola* on grapevine. *EPPO Bulletin* 23, 619-626.
105. Orlandini S., Gozzini B., Maracchi G., Rosa M., 1995: Difesa dalla peronospora per mezzo di un modello di simulazione. In: Atti della giornata di studio "La ricerca sperimentale in corso per la viticoltura in Toscana". 27 maggio 1993, San Felice, Siena (Italia), 227-229.
106. Orlandini S., Gozzini B., Rosa M., Seghi L. 1996: Ruolo dell'agrometeorologia nella difesa delle colture. II. Applicazione alla peronospora della vite. *Informatore Fitopatologico*, 7-8, 48-52.
107. Orlandini S., Rosa M. 1997: A model for the simulation of grapevine downy mildew. *Petria*, 7, Suppl. 1, 47-54.
108. Palmer, W.C. 1965: *Meteorological Drought*, Res. Pap. No45, US Weather Bureau, Washinton, DC 1-58
109. Palmer, W.C. 1968: Keeping track of crop moisture conditions nationwide: The new crop moisture index. *Weatherize* 21: 156-161
110. Paltridge G.W., and Barber 1. 1988: Monitoring grassland dryness and fire potential Australia with NOAA-AVHRR data, *remote Sens. Environ.*, 25, 381-393.
111. Pascale, A. J., 1969: Agroclimatic types for the soybean crop in Argentina. Fifth International Biometeorological Congress, Montreux, Switzerland.
112. Penman, H. L., 1948: Natural evaporation from open water, bare soil and grass. *Proc. Roy Soc. London, A* 133:1-120.
113. Penning de Vries F.W.T., Jansen D.M., Ten Berge H.F.M., and Bakema A., 1989: Simulation of ecophysiological processes of growth in several annual crops, *Simulation monographs* 29, Pudoc Wageningen : 271p.
114. Pereira J.M.C, T.M. Oliveira and J.P.C. Paul, 1994, Fuel mapping in a Mediterranean subtend using Landsat TM imagery, in P.J. Kennedy and M. Karteris, (eds), *Proc. International Workshop on Satellite technology and GIS for Mediterranean forest mapping and fire management*, (Office for Official Publications of the European Communities: Luxembourg), 97-106.

115. Porter J.R. 1984: A model of canopy development in winter wheat. *Journal Agricultural Science, Comb.* 12: 383-392.
116. Porter J.R., Janieson P.D., Wilson D.R. 1993: Comparison of the wheat simulation models AFRCWHEAT2, CERES-Wheat and SWHEAT for non-limiting conditions of crop growth. *Field Crops Research* 33:137-157.
117. Primault, B., 1969a: D'une application pratique des indices biometeorologiques: (A practical application of biometeorological indices). *Agricultural Meteorology*, 6:11-96.
118. Primault, B., 1969b: Essai de developpement d'une methode mathematique pour le determination des indices biometeorologiques (Development of a mathematical method for the determination of biometeorological indices). *La Recherch Agronomique, en Suisse*, 8:380-398.
119. Primault, B., 1980: Choix des elements et de leurs limites dans l'etablissement de modeles biometeorologiques (The choice and limitations of parameter used in establishing biometeorological models). *Bull. OEPP* 10:53-59.
120. Prince S.D., 1991: Satellite remote sensing of primary production : comparison of results for sahelian grasslands 1981- 1988, *Int. J. Remote Sens.*, 12 (6) :1301-1310.
121. Prince S.D., and Tucker J.C., 1986: Satellite remote sensing of rangelands in Botswana. II. NOAA/IAVHRR and herbaceous vegetation. *Int. J. Remote Sensing*, 7 (11) :1555-1570.
122. Richardson A.M., and Wiegand C.L., 1977: Distinguishing vegetation from soil background information. *Photogr. Eng. R. S.*, 43 :1541-1552.
123. Ripley. P. O., 1959: Progress Report 1954-1958. Field Husbandry, Soils and Agricultural Engineering Division, Experimental Farms Service, Canada Department of Agriculture, Ottawa. 41 pp.
124. Ritchie J.T., Otter S. 1985: Description of performance of CERES Wheat : A useoriented wheat yield model. United States Department of Agriculture, Agricultural Research Service, ARS 38: 159-175.
125. Ritchie J.T., 1992: Genetic specific data for crop modeling, In: *Proceedings of the Systems Approaches for Agricultural Development*, Bangkok, 2-6 December 1991, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht.
126. Robertson, G. W., 1953: Some agrometeorological problems in Canada. *Royal Meteorological Society, Canadian Branch*, 4(2):1-21.
127. Robertson, G. W., 1968: A biometeorological time scale for a cereal crop involving day and night temperatures and photoperiod. *Int. J. Biometeor.*, 12:191-223.
128. Robertson, G. W., 1970: Letter to the Editor re wheat injury during various development stages caused by freezing temperatures. *Can. J. Plant Sci.*, 50:362.
129. Robertson, G. W., 1973: Development of simplified agroclimatological procedures for assessing temperature effects on crop development. Pp. 321-343 in *Plant Response to Climatic Factors.*, Proc. Uppsala Sym. 1910 (Ecology and Conservation Series 5). Unesco, Paris. 574 pp.
130. Robertson, G. W., 1976: Daily global energy estimates from observations of bright sunshine and rainfall. Project Field Report No. A-3. UNDP/FAO Technical Assistance to the Federal Land Development Authority, Tun



- Razak Agriculture Research Centre, Sugei Tekam, Jerantut, Pahang, Malaysia. 25 pp.
131. Robertson, G. W., 1977: A versatile soil water budget for drought prone regions and dryland farming areas in India. Prepared as part of FAO/TF/IND/136, Drought Prone Areas Project. Dryland Agricultural Centre, Hyderabad, India. 50 pp.
  132. Rosa M., Genesio R., Gozzini B., Maracchi G., Orlandini S. 1993: PLASMO: a computer program for grapevine downy mildew development forecasting. *Computers and Electronics in Agriculture*, 9, 205-215.
  133. Rosa M., R., Gozzini B., Maracchi G., Orlandini S., Seghi L. 1997: The PLASMO model for grapevine protection. *Viticultural and Ecological Sciences* 52, 180-181.
  134. Rosa M., Gozzini B., G., Orlandini S. 1995: Guida a PLASMO. Manuale tecnico CeSIA N° 18, Accademia dei Georgofili, Firenze (Italia), pp. 63.
  135. Rosa M., Gozzini B., G., Orlandini S., Seghi L. 1995: A computer program to improve the control of grapevine downy mildew. *Computers and Electronics in Agriculture*, 12, 311-322.
  136. Rosa M., Orlandini S. (1997). Structure and application of the PLASMO model for the control of grapevine downy mildew. *Petria*, 7, Suppl. 1, 61-70.
  137. Ross, P. J., 1971: A computer program for fitting non-linear regression models to data by least squares. CSIRO Aust. Div. Soils Tech. Pap. No. 6.
  138. Rouse J.W., Haas R.H., Schelle J.A., Deering D.W., and Harlan J.C., 1974: Monitoring the vernal advancement and retrogradation (greenwave effect) of natural vegetation, NASA/GSFC, Type III, Final report, Greenbelt : 371p.
  139. Sands P.J., Regel N.A 1983: A model of the development and bulking of potatoes. (*Solanum tuberosum* L.), V. A simple model for predicting graded yields. *Field Crops Research*, 6:25-40.
  140. Satyr ZA, 1973: Two-factor optimisation model weather-yield. *Collect Works IEM* 3(40): 109-114 pp.
  141. Seghi L., Gozzini B., Maracchi G., Orlandini S., Rosa M. 1993: Applicazione del programma PLASMO alla difesa antiperonosporica del vigneto. In: Atti del Convegno "Protezione delle colture: osservazioni, previsioni, decisioni". 7-8 ottobre 1993, Pescara (Italia), 339-356.
  142. Sellers P.J., 1985: Canopy reflectance, photosynthesis and transpiration. *Int. J. Remote Sensing*, 6 :1335-1372.
  143. Sharman M., 1993, Monitoring Vegetation Condition Using AVHRR. COST 77 – Working paper: Estimating Agricultural Yield using Remote Sensing Data, 45.
  144. Sierra, E. M., 1977: Energetic-photo-thermal development model for medium late and late soybean cultivars. *Agricultural Meteorology*, 18:277-291.
  145. Sierra, E. M. and Murphy, G. M., 1977: Expresion de lá influencia de lá temperatura y fotoperiodo sobre el desarrollo del sorgo granifero (*Sorghum caffrorum* (Retz) P. Beauv.) (Photothermal effects on crop development in grain sorghum (*Sorghum caffrorum* (Retz) P. Beauv.). *Revista de lá Facultad de Agronomia (3a EP.)* LIII (1-2):47-66.



146. Silleos N., Dalezios N.R., Trikatsoula A., Perakis K. 1996: Assesment of crop damages using Remote Sensing tehcnology. International Symposium on Applied Agrometeorology and Agroclimatology. Volos 1996.
147. Συλλαιος Γ.Ν., 1990, Εφαρμογές Τηλεπισκόπησης στη Γεωργία, Θεσσαλονίκη 1990, 217 σελ.
148. Singh, S.M. 1984: Removal of atmospheric effects on a pixel by pixel basis from the thermal infrared data from instruments on satellites. The Advanced Very High Resolution Radiometer (AVHRR). Int. J. Remote Sensing 5(1): 161-183
149. Síngħ, S.M. 1988: Simulation of solar zenith angle effect on global vegetation index (GVI, Int.J. Remote Sens. 9: 237-248
150. Sivertsen T.H. Nejedlik R. Orger P. Sigvald R. 1999: The phenology of crops and the development of pests and diseases. COST 711.
151. Steinmetz S., Guerif M., Delecolle R., and Baret F.,1990: Spectral estimates of the absorbed photosynthetically active radiation and light-use efficiency of a winter wheat crop subject to nitrogen and water deficiencies. Int. Journ. Remote Sensing,11:1797- 1808.
152. Steven M.D., Biscoe P.V., and Jaggard, K.W., 1983, Estimation of sugar beet productivity from reflection in the red and infrared spectral bands, International Journal of Remote Sensingm 325-334.
153. Steven M.D., Jaggard K.W., 1995, Advances in Crop Monitoring by Remote Sensing, In: Advances in Remote Sensing (edited by M. Danson and S.E. Plummer), John Wiley & Sons Ltd., Chichester, West Sussex, England, pp. 143-156.
154. Supit I., Hooijer A.A., and Van Diepen C.A.,1994: System description of the WOFOST 6.0 crop simulation model implemented in CGMS.177 p.
155. Tarpley, J.D., 1979: Estimating incident Solar Radiation at the surface from geostationary satellite data, J. Appl. Meteorol., 18, 1172-1181.
156. Tarpley, J.D. 1992: Monthly evapotranspiration from satellite and conventional Meteorological Observations, J. Climate 7: 704-713
157. Taylor, B.F., Dini, P.W. and Kidson, J.W. 1985: Determination of seasonal and interannual variations in New Zealand pasture growth from NOAA 7 data, Remote Sens. Environ. 18: 177-192
158. Teillet, P.M., Slater, P.N., Ding, Y., Santer, RP., Jackson, R.D. and Moran, M.S. 1990: Three methods for the absolute calibration of the NOAA AVHRR sensors in-ilight, Remote Sens. Environ. 31: 105-120
159. Teng, P., Yuen J. 1990: Workshop on modeling pest-crop interactions. Honolulu Hawaii, January 1990. International Benchmark Sites Network for Agrotechnology Transfer (IBSNAT) ed., 57 pp.
160. Treidl, R. A., 1978: Handbook on Agricultural and Forest Meteorology , Part I. Atmospheric Environment, Fisheries and Environment Canada. No. En 56-1/51, Minister of Supply and Services, Canada. 73 pp, 14 tables.
161. Thompson L.M.,1986: Climate change, weather variability, and corn production. Agronomy Journal, 78 : p. 649.
162. Tucker C.J.,1979: Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. Remote Sens. Environ.,16 :127-150.

163. Tucker C.J., Holben B.N., Elgin J.H., and McMurtry III J.E., 1981: Remote sensing of total dry-matter accumulation in winter wheat, *Remote Sensing of Environment*, 11:171-189.
164. Tucker C.J., Vanpraet C.L., Sharman M.J., and Van Isterstum G., 1985: Satellite remote sensing of total herbaceous biomass production in the senegalese sahel : 1980-1984, *Remote Sensing of Environment*, 17 : 233-249.
165. Varga-Haszonits, Z., 1971: Effect of sunshine hours and temperature on the development of the winter wheat variety Bankuti 1201. *Acta Agronomica Academiae Scientiarum Hungaricae*, 20:392-397.
166. Verhoef W., 1984: Light scattering by leaf layers with application to canopy reflectance modeling: the SAIL model. *Remote Sensing of Environment*, 16 :125-141.
167. Viovy N., 1990: Etude spatiale de la biosphere terrestre : Integration de modeles ecologiques et de mesures de teledetection, These, I.N.P. Toulouse : 213 p.
168. Weir A.H., Bragg P.L., Porter J.R., Rayner J.H. 1984: A winter wheat crop simulation model without water or nutrient limitations. *The Journal of Agricultural Science, Cambridge* 102: 371-382.
169. Went, F. W., 1956: The experimental control of plant growth. *Chronica Botanica*, Co.
170. Wetzal, P.J. and Atlas, D. 1983: Inference of soil moisture from geosynchronous satellite infrared observations, *Proc. Sixth Conf. Biometeorology and Aerobiology, Amer. Meteor. Soc.*, April 25, 1983
171. Wetzal, P.J., Atlas, D. and Woodward, R.H. 1984: Determining Soil moisture from geosynchronous satellite infrared data: A feasibility study, *J. Clim. Appl. Meteor.* 23: 375-391
172. Wiegand C.L., and Richardson A.J., 1984: Leaf area, light interception, and yield estimates from spectral components analysis. *Agron. J.*, 76 : 543-548.
173. Williams, C. N. and Joseph, K. T., 1970: *Climate, Soil and Crop Production in the Humid Tropics*. Oxford in Asia College Texts, Kuala Lumpur. 177 pp.
174. Williams, G. D. V., 1974a: Deriving a biophotothermal time scale for barley. *Int. J. Biometeorol.*, 8:51-69.
175. Williams, G. D. V., 1974b: A critical evaluation of a biophotothermal time scale for barley. *Int. J. Biometeorol.*, 18:259-271.
176. Wylie B.K., Harrington J.A., Prince S.D., and Denda I., 1991: Satellite and ground-based pasture production assessment in Niger : 1986-1988, *Int. J. Remote Sens.*, 12 (6) :1281-1300.
177. Ζάρπας Δ. Κώστας, 1995, Ο Ρόλος του Δείκτη Βλάστησης από Δορυφορικές Εικόνες NOAA/AVHRR στην Εξέλιξη των Καλλιεργειών, Πτυχιακή Διατριβή, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Βόλος, 85σελ.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6. ΣΤΟΧΑΣΤΙΚΑ ΜΟΝΤΕΛΑ

Η γεωργία και οι συγγενείς επιστήμες υφίστανται μια ραγδαία εξέλιξη. Τα μαθηματικά, μάλλον όντας περισσότερο ένα χρήσιμο εργαλείο για την περιγραφή αποτελεσμάτων έρευνας και την σύνδεσή τους με θεωρητικές έννοιες, υποστηρίζονται ολοένα και πιο πολύ σαν η μόνη πιθανή προσέγγιση διαφόρων προβλημάτων. Σε συνθήκες επιστημονικής μεθοδολογίας η συνήθης κατάσταση μπορεί να καθοριστεί σαν η αρχή του τελικού σταδίου με τους συνηθισμένους τρόπους επαφής της επιστημονικής έρευνας να είναι κυρίαρχοι.

Από τα προηγούμενα κεφάλαια έγινε κατανοητό ότι τρία στάδια είναι διακριτά στους τρόπους με τους οποίους περιγράφονται και εξηγούνται οι σχέσεις μεταξύ φυσικού περιβάλλοντος και γεωργικής παραγωγής. Στο πρώτο στάδιο, επικρατούν περιγραφικές προσεγγίσεις, με τις σχέσεις μεταξύ καιρού (κλιματικές συνθήκες) και γεωργικής παραγωγής να εξηγούνται στη βάση της αγρονομίας και της φυσιολογίας φυτού. Στο δεύτερο στάδιο αυτή η περιγραφική προσέγγιση αντικαταστάθηκε από μια εμπειρική στατιστική που δίνει έμφαση περισσότερο στην έρευνα για άμεση σχέση μεταξύ εισαγομένων και εξαγομένων σε ένα σύστημα μαύρου κουτιού.

Το τρίτο στάδιο στην επίλυση προβλημάτων παραγωγής-περιβάλλοντος, αφορά μια ποιοτική θεώρηση της γεωργικής παραγωγής, επιδρώντας στην αλλαγή από μια στατική σε μια δυναμική παρουσίαση των σχέσεων παραγωγής-περιβάλλοντος.

Η πολυπλοκότητα είναι το κύριο πρόβλημα στο σχεδιασμό στατιστικών μοντέλων για το σύστημα φυτό-καιρός. Όμως αν το φυτό αντιμετωπίζεται σαν ένα ανοιχτό, αναπτυσσόμενο σύστημα - πράσινη μηχανή - που παίρνει ενέργεια και υποστρώματα απ' το περιβάλλον και παράγει οργανικές ουσίες, τότε αυτό μπορεί να παρουσιασθεί μαθηματικά με δύο ομάδες εξισώσεων:

- Μια ανταλλαγή ενέργειας και μάζας περιγράφοντας τη μεταφορά ηλιακής ακτινοβολίας, θερμότητας, υγρασίας, διοξειδίου του άνθρακα και άλλων υλικών στην υπερεπιφάνεια ατμόσφαιρα - έδαφος, όπου οι παράμετροι του φυτικού υλικού λειτουργούν σαν πηγές συνεισφοράς των μεταφερόμενων υλικών.

- Ένα βιοδυναμικό σείτ περιγράφοντας την αύξηση και ανάπτυξη των φυτών και τις δυναμικές της φυτικής βιομάζας, φυλλικής επιφάνειας και γεωμετρίας φυτού, όπως οι φυτικοί παράμετροι ποικιλότητας κατά τη διάρκεια της οντογένεσης.

Το πρώτο από τα δύο σείτ καθορίζει τις συχνότητες που η λειτουργία της πράσινης μηχανής εξαρτάται από τις τρέχουσες περιβαλλοντικές συνθήκες, το δεύτερο περιγράφει τις αλλαγές που θα υποστεί στο χρόνο.

Στην ουσία τα προγράμματα που ασχολούνται με αυτού του είδους την έρευνα σκοπεύουν στις ακόλουθες τρεις αποστολές:

1. Να καθορίσουν τη σχέση φωτοσύνθεσης- αναπνοής μεταξύ ανταλλαγής CO<sub>2</sub> ενός φύλλου με τους παράγοντες του περιβάλλοντος που ελέγχονται και τις παραμέτρους του φυτού.

2. Να καθορίσουν τη σχέση μεταξύ της ολικής φυλλικής επιφάνειας ανταλλαγής αερίων και ελεγχόμενους παράγοντες.



3. Να καθορίσουν τη σχέση μεταξύ της συχνότητας ανταλλαγής αερίων της φυλλικής επιφάνειας και της παραγωγής της τρέχουσας βιομάζας, τυποποιημένο σαν ένα πακέτο από διαφορετικές εξισώσεις.

Σήμερα είναι γεγονός ότι υπάρχει πολύ μικρή ανάπτυξη και εξέλιξη μεθόδων και συστημάτων που αφορούν αυτό που ονομάζεται στοχαστική μοντελοποίηση, παρά τα όσα υπόσχεται η σύγχρονη επιστημονική τάση. Μια, σχετικά τελευταία, εφαρμογή αφορά στην χρήση ενός νευραλγικού δικτύου στην μοντελοποίηση ορισμένων διαδικασιών του αγροοικοσυστήματος.

Μια άλλη εξέλιξη της στοχαστικής μοντελοποίησης προσφέρεται σε ένα δυναμικο-στατιστικό μοντέλο για εκτιμήσεις πεδίων βοσκοτόπων. Το μοντέλο αυτό προσφέρει αισιόδοξες εκτιμήσεις του πεδίου μεταβλητών.

Στην παρούσα εργασία γίνεται μια προσπάθεια να παρουσιασθούν στις επόμενες ενότητες δυο κατηγορίες στοχαστικών μοντέλων, τα λεγόμενα:

- Δυναμικά μοντέλα
- Καταστατικά μοντέλα ή καλύτερα Kalman Filter μοντέλα.

## 6.1 Δυναμικά Μοντέλα

Όπως αναφέρθηκε στα προηγούμενα κεφάλαια η πολυπλοκότητα είναι το κύριο πρόβλημα στο σχεδιασμό στατιστικών μοντέλων για το σύστημα φυτό-καιρός. Μπορεί βασικά να διαχειριστεί με αλλαγή σε δυναμική παρουσίαση των σχέσεων. Έστω  $M(t)$  η βιομάζα του φυτού σε συνάρτηση με το χρόνο  $t$ . Για τον υπολογισμό της μια διαφορετική εξίσωση πρέπει να γραφτεί:

$$M^{j+1} = M^j + F(M^j, X^j, A^j) \Delta t \quad (6-1)$$

Αυτό αποτελεί τη βασική διαφορά μεταξύ των δυναμικών μοντέλων και των εμπειρικών στατιστικών σχέσεων. Η πολυδιάσταση  $A$  καθορίστηκε απλώς και μόνο από το βαθμό της λεπτομέρειας στην μαθηματική περιγραφή του σχεδίου παραγωγής του φυτού. Η πρακτική έχει δείξει ότι σε ένα μοντέλο αγροοικοσυστήματος ίσως περιέχονται αρκετά αν η τιμή του  $A$  δεν είναι μεγαλύτερη από 10.

Έτσι η αλλαγή συστήματος σε δυναμική περιγραφή θα είχε αποτέλεσμα στη μείωση τουλάχιστον 11 φορές στον αριθμό των παραμέτρων που πρέπει να καθοριστούν. Στην πράξη το κέρδος θα ήταν μεγαλύτερο επειδή η εξίσωση 6-1 είναι μη γραμμική.

Τελικά η εξίσωση 6-1 μπορεί μέσω του  $M_j$ , την παραπάνω οντογένεση του φυτού να την πάρει από υπολογισμούς, όταν περιγράφει την ανταπόκριση του φυτού σε τρέχουσες υδρομετεωρολογικές συνθήκες.

Στην ουσία τα προγράμματα που ασχολούνται με αυτού του είδους την έρευνα σκοπεύουν στις ακόλουθες τρεις αποστολές:

1. Να καθορίσουν τη σχέση φωτοσύνθεσης- αναπνοής μεταξύ ανταλλαγής  $CO_2$  ενός φύλλου με τους παράγοντες του περιβάλλοντος που ελέγχονται και τις παραμέτρους του φυτού.
2. Να καθορίσουν τη σχέση μεταξύ της ολικής φυλλικής επιφάνειας ανταλλαγής αερίων και ελεγχόμενους παράγοντες.
3. Να καθορίσουν τη σχέση μεταξύ της συχνότητας ανταλλαγής αερίων της φυλλικής επιφάνειας και της παραγωγής της τρέχουσας βιομάζας,



τυποποιημένο σαν ένα πακέτο από διαφορικές εξισώσεις: ολοκλήρωσε αυτό το πακέτο εξισώσεων για να αποκτήσεις το τελικό επίπεδο της βιομάζας των φυτών.

Στη συνέχεια εξετάζεται σύντομα η λογική δομή της θεωρίας παραγωγής. Ένα φυτό αντιμετωπίζεται σαν ένα ανοιχτό, αναπτυσσόμενο σύστημα - πράσινη μηχανή - που παίρνει ενέργεια και υποστρώματα απ' το περιβάλλον και παράγει οργανικές ουσίες. Σύμφωνα με κάποιους υπολογισμούς χρησιμοποιώντας 2 τόνους από την ατμόσφαιρα και 250-400 κιλά μέταλλα απ' το έδαφος, ένα φυτό μπορεί να παράγει 1 τόνο οργανικό υλικό, προσλαμβάνοντας 500-1000 τόνους νερό στην πορεία.

Μια μαθηματική δομή παρουσιάζοντας ξανά την πιο πάνω περιγραφή, αποτελείται από δύο σχετικά σετ εξισώσεων:

1. μια ανταλλαγή ενέργειας και μάζας περιγράφοντας τη μεταφορά ηλιακής ακτινοβολίας, θερμότητας, υγρασίας, διοξειδίου του άνθρακα και άλλων υλικών στην υπερεπιφάνεια ατμόσφαιρα - έδαφος, όπου οι παράμετροι του φυτικού υλικού λειτουργούν σαν πηγές συνεισφοράς των μεταφερόμενων υλικών.

2. Ένα βιοδυναμικό σετ περιγράφοντας την αύξηση και ανάπτυξη των φυτών και τις δυναμικές της φυτικής βιομάζας, φυλλικής επιφάνειας και γεωμετρίας φυτού, όπως οι φυτικοί παράμετροι ποικιλότητας κατά τη διάρκεια της οντογένεσης.

Το πρώτο από τα δύο σετ καθορίζει τις συχνότητες που η λειτουργία της πράσινης μηχανής εξαρτάται από τις τρέχουσες περιβαλλοντικές συνθήκες, το δεύτερο περιγράφει τις αλλαγές που θα υποστεί στο χρόνο.

### 6.1.1 Προσομοιώνοντας την ανταλλαγή ενέργειας και μάζας για το σύστημα Έδαφος- Φυτό- Ατμόσφαιρα

Ας γίνει μια προσπάθεια τυποποίησης ενός σετ προσομοίωσης ανταλλαγής ενέργειας και μάζας για το σύστημα Έδαφος- Φυτό- Ατμόσφαιρα. Υποθέτοντας, ως συνήθως, τα ρεύματα όλων των ουσιών στον κατώτερο αέρα να είναι μέχρι ενός βαθμού σταθερή κατάσταση, οι ακόλουθες προσομοιώσεις πρέπει να γραφτούν για μια ομοιογενή φυλλική επιφάνεια, να περιγράψουν διαδικασίες μεταφοράς για θερμότητα, για ατμούς νερού και διοξείδιο του άνθρακα.

Σ' αυτές τις προσομοιώσεις **a,p,s** είναι οι υποσημειώσεις καθορίζοντας τιμές για ατμόσφαιρα, φυτά και έδαφος αντίστοιχα:  $Z1 = Z + \Pi 1$

**Ta, Tp, Ts** - είναι τιμές θερμοκρασίας

**qa, qs** - είναι ειδικές τιμές υγρασίας για ατμοσφαιρικό και εδαφικό αέρα

**qp** - είναι η υγρασία σε θερμοκρασία **Tr**

**K** - ο συντελεστής ανταλλαγής

**S** - η ειδική πυκνότητα φυλλικής επιφάνειας

**C** - το περιεχόμενο του αέρα σε διοξείδιο του άνθρακα

**D<sub>T</sub>** - ο συντελεστής ανταλλαγής θερμότητας και νερού

**Ω** - η συχνότητα ανταλλαγής διοξειδίου του άνθρακα για κάθε μονάδα φυλλικής επιφάνειας

**I** - είναι η ολική και τυχαία ροή μικρού μήκους κύματος ακτινοβολίας

**Pa, Cp** - η πυκνότητα αέρα και η ικανότητα θερμότητας

$F$  - είναι η αντίστοιχη ροή ακτινοβολίας μεγάλου μήκους κύματος  
 $X$  - η λανθάνουσα θερμότητα εξάτμισης  
 $\sigma$  - η σταθερά Stefan- Boltzman  
 $\Omega, \gamma_p$  - είναι οι συντελεστές  
 $\Theta_a$  - το κύριο κομμάτι της υγρασίας του εδάφους  
 $K_s$  - η υδραυλική μετάδοση του εδάφους  
 $\omega_s$  - η δυναμική του συστήματος εδάφους - νερού  
 $\varepsilon_1$  - είναι η συχνότητα εξάτμισης για κάθε μονάδα όγκου εδάφους  
 $\varepsilon_2$  - η συχνότητα πρόσληψης νερού απ' τις ρίζες για κάθε μονάδα όγκου εδάφους  
 $V_\theta$  - η εδαφική περατότητα  
 $J_s$  - ο δείκτης συστροφής  
 $D_v$  - ο συντελεστής διάχυσης υδρατμών στον αέρα  
 $\rho_w$  - η πυκνότητα νερού  
 $C_s, \lambda_s$  - η ογκομετρική ικανότητα του νερού και η θερμική αγωγιμότητα του εδάφους αντίστοιχα  
 $\Theta_p$  - το περιεχόμενο ογκομετρικής υγρασίας των φυτών  
 $\alpha_p$  - η ειδική πυκνότητα βιομάζας του φυτού  
 $K_p$  - ο δείκτης υδραυλικής αγωγιμότητας του ξυλώματος  
 $\Psi_p$  - το υδατικό δυναμικό των φυτικών ιστών

Με βάση λοιπόν αυτές τις παραμέτρους δημιουργούνται οι παρακάτω σχέσεις

$$d/dz \left[ K \left( dT_a/dz \right) \right] + SD_T \left[ T_p - T_a \right] = 0 \quad \text{θερμότητα} \quad (6-2)$$

$$d/dz \left[ K \left( dq_a/dz \right) \right] + SD_q \left[ q_p - q_a \right] = 0 \quad \text{νερό} \quad (6-3)$$

$$d/dz \left[ K \left( dc/dz \right) \right] + S\Omega = 0 \quad \text{CO}_2 \quad (6-4)$$

Μια εξίσωση του ισοζυγίου θερμότητας της φυτικής βιομάζας μπορεί να γραφτεί σε μια σταθερής κατάστασης προσέγγιση, για φυτά με λεπτά φύλλα και όχι ογκώδη βλαστό:

$$d/dz \left[ I + F \right] - \rho_a C_p D_T S \left[ T_p - T_a \right] - \chi \rho_a D_q S \left[ q_p - q_a \right] = 0 \quad (6-5)$$

Η εξίσωση (6-5) περιέχει δύο άγνωστες συναρτήσεις  $I$  και  $F$ . Για να υπολογιστούν, πρέπει να χρησιμοποιηθούν οι απλούστερες εξισώσεις ανταλλαγής ακτινοβολίας σε μια προσέγγιση δύο ροών:

$$dI/dz = (\omega/2)SI + [1 - \omega/2]SI, \quad dI/dz = [1 - \omega/2]SI + (\omega/2)SI \quad (6-6)$$

$$dF/dz = -S\gamma_F F + \sigma T_p^4 S, \quad dF/dz = -S\gamma_F F + \sigma T_p^4 S \quad (6-7)$$

Το επόμενο βήμα είναι να γραφούν οι εξισώσεις για το δεύτερο μέσο του περιβάλλοντος του φυτού- έδαφος. Η πιο ευρέως χρησιμοποιούμενη

μέθοδος μαθηματικής περιγραφής μεταφοράς νερού στη ζώνη αερισμού που υφίσταται επίδραση από τριχοειδείς και δυνάμεις βαρύτητας παρουσιάζεται με την ακόλουθη εξίσωση:

$$\delta\theta_s/\delta t = (\delta/\delta z) K_s [\delta(\psi_s - z_1)/\delta z] - \varepsilon_1 - \varepsilon_2 \quad (6-8)$$

Προφανώς η εξίσωση 6-8 μπορεί να περιγράψει μόνο τις ισοθερμικές διαδικασίες μεταφοράς εδαφικού νερού. Μια εξίσωση ισοθερμικής μεταφοράς ατμού διάμεσο των πόρων του μέσου, μπορεί να γραφτεί

$$\delta/\delta t [p_a (V_\theta - \Theta_s) q_s] = \delta/\delta z D_n \xi_s p_a [V_\theta - \Theta_s] \delta q_s/\delta z + \varepsilon_1 \rho_w \quad (6-9)$$

Πρέπει να δωθεί μια εξίσωση μεταφοράς θερμότητας στο έδαφος με τέτοιο τρόπο ώστε να υπολογισθεί η ενεργειακή άποψη των αλλαγών φάσεων του νερού ως εξής:

$$\delta/\delta t [C_s T_s] = (\delta/\delta z \lambda_s) (\delta T_s/\delta z) - \chi \rho_w \varepsilon_1 \quad (6-10)$$

Για να κλείσει το πιο πάνω σετ εξισώσεων, μια άλλη σχέση απαιτείται η οποία θα μπορούσε να περιγράψει τη μεταφορά νερού διάμεσο των αγγείων του μονοπατιού ρίζας-φύλλου ως εξής:

$$\delta/\delta t [\alpha_p \theta_p] = (\delta/\delta z) [\beta_p K_p \delta(\psi_p - z_1)/\delta z] + \varepsilon \quad (6-11)$$

Για την ολοκλήρωση των εξισώσεων 6-1 έως 6-11 πρέπει να καθοριστούν οριακές συνθήκες. Υποθέτοντας ότι αυτές είναι σχέσεις μεταξύ ρευμάτων θερμότητας, διοξειδίου του άνθρακα και ακτινοβολίας (I και F), οι τιμές τους καθορίστηκαν για αδιατάραχτη ατμόσφαιρα πάνω από το φυτό, οι τιμές θερμοκρασίας και υγρασίας στα χαμηλότερα όρια της προσομοίωσης στρώματος εδάφους, συνεχείς συνθήκες θερμοκρασίας αέρα και υγρασία, θερμότητα και ισορροπίες νερού –ατμού στην υπερεπιφάνεια όπως και κάποιες άλλες εμφανείς σχέσεις.

Αυτό το σετ εξισώσεων απεικονίζει έναν “normal” προσδιορισμό ενός προβλήματος ολοκλήρωσης ανταλλαγής ενέργειας και μάζας για το σύστημα Έδαφος – Φυτό – Αέρας. Απλά προβλήματα ολοκλήρωσης, περικλείοντας διαφορετικές τροποποιήσεις για τα δύο συνδεόμενα μέσα με τα εισαγόμενα φυτά, μελετήθηκαν με αριθμητικές μεθόδους από διάφορους ερευνητές.

Οι προσομοιώσεις που έγιναν “τρέχοντας” ένα - το πιο λεπτομερές σε όρους βιολογίας - μοντέλο της SPA ανταλλαγής νερού, είναι οριακής εφαρμοστικότητας, επειδή στερούνται εμπειρικών δεδομένων σε ένα μεγάλο αριθμό σταθερών που χρησιμοποιούνται στη φόρμουλα του μοντέλου.

### 6.1.2 Ανταλλαγή Ενέργειας και Μάζας στη φυλλική επιφάνεια

Οι προσπάθειές για ανάλυση προβλημάτων ανταλλαγής ενέργειας για το επιφανειακό μέρος του εδάφους της καλλιέργειας είχαν σαν σκοπό κυρίως να απλοποιήσουν το πρόβλημα και να αποκτήσουν αναλυτικές λύσεις (εξισώσεις 5 και 8)

Η μελέτη της ακτινοβολίας της περιοχής της φυλλικής επιφάνειας παρουσίασε μια σειρά προβλημάτων για την απορρόφηση, διασπορά, μετάδοση και εκπομπή ακτινοβολίας από τα φυτά και περιγράφεται απ' τις εξισώσεις 9 και 10.

Ο Tooming (1971) ασχολήθηκε με εφαρμοσμένες μελέτες του παραπάνω προβλήματος. Αυτές οι μελέτες θα μπορούσαν να προσφέρουν μια ικανοποιητική απάντηση στις προσομοιώσεις των απαιτήσεων της παραγωγής των φυτών, θέτοντας μια βάση για μελλοντικές αναπτύξεις προσομοιώσεων (πρωταρχικά για τον υπολογισμό μικρού μήκους κύματος ακτινοβολίας). Ο υπολογισμός περιοχών του φυτού μεγάλου μήκους κύματος ακτινοβολίας περιέχει κάποια άλυτα προβλήματα.

Κανένας ορισμός του αεροδυναμικού συστήματος του φυτού δεν δόθηκε στο πρόβλημα (εξισώσεις 6-2 ως 6-11) αν και οι εξισώσεις 6-2 και 6-4 περιλαμβάνουν την συνάρτηση  $k(z)$  και τα  $D_T$ ,  $D_q$ , όταν εκφράζονται μέσω αντίστασης, εξαρτώμενοι από την ταχύτητα του ανέμου. Έτσι:

$$D_T = 1 / r_a, \quad D_q = 1 / r_a + r_s \quad (6-12)$$

όπου,  $r_s$  είναι η αντίσταση των στομάτων

$r_a$  η αντίσταση του φυλλικού οριακού στρώματος που είναι αντιστρόφως ανάλογη με την ταχύτητα του τοπικού ανέμου.

Ως εκ τούτου οι συναρτήσεις  $k(z)$  και  $u(z)$  θα έπρεπε να χρησιμοποιηθούν ειδικά για να λύσουν τις εξισώσεις 6-2 ως 6-11. Αυτό ίσως θα έπρεπε να γίνει με διάφορους τρόπους. Τα έργα του υπολογισμού των συστημάτων νερού και θερμότητας αντιμετωπίστηκαν χρησιμοποιώντας μια γραμμική προσέγγιση αυτών των συναρτήσεων και η  $k(z)$  αντιμετωπίστηκε με μια εκθετική προσέγγιση του  $k(z)$ .

Ο υπολογισμός των  $k(z)$  και  $u(z)$  με τη βοήθεια ενός φυσικά βασισμένου μοντέλου θα ήταν καλύτερος. Το πιο συχνά χρησιμοποιούμενο μοντέλο είναι του αεροδυναμικού συστήματος του φυτού για την περίπτωση ουδέτερης διαστρωμάτωσης, σχεδιασμένο απ' τον Menzhulin (1970, 1973) παρά την όλη κριτική για αυτό το ημιεμπειρικό μοντέλο.

Μολονότι, επειδή οι περισσότερες φυλλικές επιφάνειες (όπως είναι αλήθεια τουλάχιστον για τα σιτηρά) είναι συνήθως αρκετά αεριζόμενες, η ασφάλεια με την οποία  $k(z)$  και  $u(z)$  είναι καθορισμένες αναπτύσσονται συγκριτικά μικρή επίδραση στους υπολογισμούς των συστημάτων του νερού και της θερμότητας. Ως εκ τούτου, στις περισσότερες περιπτώσεις, για πρακτικούς σκοπούς, κάθε λογική παρουσίαση αυτών των τιμών αρκεί.



### 6.1.3 Μεταφορά θερμότητας και νερού στο έδαφος

Μια πλήρης παρουσίαση ενός μοντέλου για το πεδίο έδαφος – θερμοκρασία θα έπρεπε να αποτελείται από ένα σετ 4 εξισώσεων για τη μεταφορά θερμότητας διαμέσω μετάδοσης, μεταγωγής, ακτινοβολίας και υγρασίας. Ένας αποτελεσματικός τρόπος να περάσει κανείς αυτές τις δύσκολες καταστάσεις είναι ένα μοντέλο ισοδύναμης μεταδιδόμενης θερμότητας που είναι περιορισμένο σε μια μόνο εξίσωση (6-10) με μια πολύπλοκη εξάρτηση από τους συντελεστές μεταφοράς της θερμότητας στο σύστημα έδαφος-νερό και από τα άλλα χαρακτηριστικά του εδάφους.

Το υδατικό καθεστώς είναι βασικής σημασίας για τη ζωή του φυτού. Κανένα μοντέλο παραγωγής φυτού δεν μπορεί να σχεδιαστεί χωρίς να περιέχει σχέσεις για το νερό ενώ υπάρχουν παραδείγματα μοντέλων με το μόνο δυναμικό κομμάτι να παρουσιάζεται σαν εξισώσεις μεταφοράς από το σύστημα έδαφος- νερό. Όταν περιγράφεται η κατάσταση του νερού δύο βασικά διαφορετικές διαδικασίες θα έπρεπε να διακριθούν όπως η ύγρανση του εδάφους και η ξηρασία. Κατά τη διάρκεια της καλλιεργητικής περιόδου, όταν αυτή εξετάζεται σαν σύνολο, οι υγρές περίοδοι (που ακολουθούν μετά από ισχυρές βροχοπτώσεις) εξηγούν ένα μέσο κλάσμα του ολικού χρόνου.

Η ξηρασία είναι μεγάλης σημασίας για τη ζωή των φυτών. Οι εξισώσεις (6-8) και (6-9) μπορούν να περιγράψουν και τις δύο καταστάσεις. Έτσι λαμβάνοντας υπόψη τη διαφορά στη σημασία αυτών των καταστάσεων, όπως στο γεγονός ότι τα χαρακτηριστικά τους ουσιωδώς διαφέρουν για σκοπούς προσομοίωσης για παραγωγή φυτών, η κύρια έμφαση θα έπρεπε να δοθεί στην περιγραφή των πιο αργών διαδικασιών της ξηρασίας. Αυτό θα επέτρεπε ένα σημαντικά μεγαλύτερο χρονικό βήμα για την αριθμητική λύση του προβλήματος.

Η κατάσταση υγρασίας, με τη σειρά της, μπορεί να μετρηθεί χρησιμοποιώντας το ακόλουθο σχήμα: η ολική βροχόπτωση (ή ο τύπος άρδευσης) προστίθεται στην τιμή του αποθηκευμένου νερού για το επιφανειακό στρώμα εδάφους. Αν το ολικό αποτέλεσμα είναι μεγαλύτερο από την ικανότητα του υγρού, τότε το πλεονάζων νερό εισέρχεται στο δεύτερο στρώμα και η διαδικασία επαναλαμβάνεται για το επόμενο όπως και για όλα τα άλλα στρώματα.

Για τη λύση εξισώσεων μεταφοράς νερού, δύο προσθετικές συναρτήσεις θα έπρεπε να είναι διαθέσιμες: οι σχέσεις μεταξύ της υδραυλικής μεταφοράς  $K_s$  και της δυναμικής του συστήματος εδάφους-νερού  $\psi_s$ , καθώς και η προέκταση του κορεσμού του εδάφους. Ένας μεγάλος αριθμός μελετών έχουν γίνει για να προσεγγίσουν αυτές τις σχέσεις από εμπειρικά δεδομένα και να καθορίσουν σχέσεις μεταξύ συντελεστών και εύκολα μετρηθέντων παραμέτρων εδάφους όπως η πυκνότητα, η περιεκτικότητα σε χούμο κτλ

Η Pavlou (1986) περιγράφει ενδιαφέρουσες προτάσεις για τη δυναμική του εδαφικού νερού και την αγωγιμότητά του. Οι διαθέσιμες συναρτησιακές εκφράσεις για το  $e_2$  ίσως πρέπει να τοποθετηθούν σε δύο κατηγορίες: μικροσκοπικές και μακροσκοπικές. Τα μοντέλα που εμπίπτουν στην πρώτη κατηγορία μεταχειρίζονται το ριζικό σύστημα σαν σετ κυλίνδρων μιας μόνιμης ακτίνας και συνήθως χρησιμοποιούν μια αναλυτική λύση της εξίσωσης για την ακτινωτή ροή του νερού.

Εξετάζεται επίσης η δυνατότητα εφαρμογής ασυμπτωτικών μεθόδων για τη λύση τέτοιων εξισώσεων. Ένα πλεονέκτημα των μικροσκοπικών

μοντέλων είναι η προσιτή τυποποίηση διαδικασιών πρόσληψης εδαφικού νερού. Έτσι η εκχώρηση οριακών συνθηκών στην επιφάνεια της ρίζας όπως και άλλων παραμένει προβληματική.

Η μακροσκοπική παρουσίαση της συνάρτησης  $\varepsilon_1$  υποθέτει ότι η λειτουργικότητα ολόκληρου του ριζικού συστήματος θα έπρεπε να θεωρηθεί σαν να απορροφά νερό από κύριο εδαφικό όγκο. Σ' αυτή την παρουσίαση η  $\varepsilon_2$  είναι συνήθως ορισμένη ως εξής:

$$\varepsilon_2 = k(\psi)_s \psi_p - \psi_s / \beta(z) \quad (6-13)$$

όπου  $\beta(z)$  είναι ένας παράγοντας αναλογικότητας μεταχειριζόμενος με διαφορετικούς τρόπους από διάφορους συγγραφείς. Σε μερικές έρευνες χρησιμοποιούνταν ως η αναλογία βάρους ρίζας για συγκεκριμένο στρώμα προς το ολικό βάρος ρίζας, ή σαν εκθετική συνάρτηση που εξαρτάται από το τρέχον ολικό βάρος του ριζικού συστήματος. Δεν είναι τελείως ξεκάθαρο αν οι ρίζες απορροφώντας νερό από κορεσμένο στρώμα εδάφους μπορούν να το μεταφέρουν διαμέσου ξυλώματος και να το αποδώσουν σε ξηρότερα στρώματα.

Το επόμενο βήμα είναι ο υπολογισμός του  $\varepsilon_1$ , όπως ο ορισμός της εξάρτησης από την εσωτερική εδαφική εξάτμιση στους αποφασιστικούς παράγοντες. Ο Dandaron (1974) έκανε πειραματικές και θεωρητικές μελέτες της κινητικής της απορρόφησης και εκρόφησης ατμού κάτω από αλλαγές στη θερμοκρασία του αποξηραμένου στρώματος. Τελικά ίσως κανένα ικανοποιητικό μοντέλο δεν έχει δημιουργηθεί που θα επέτρεπε περιγραφή εξάτμισης από ξηρά εδάφη αν και διάφορες ημιεμπειρικές προσεγγίσεις έχουν προταθεί δίνοντας επιτυχημένες λύσεις των προβλημάτων. Αυτά περιλαμβάνουν την ιδέα του αποξηραμένου στρώματος αναπτυσσόμενη από τον Budagovsky (1964, 1980).

#### 6.1.4 Παραμετροποίηση μοντέλων ανταλλαγής ενέργειας και μάζας

Ένα σχήμα υπολογισμού ανταλλαγής ενέργειας και μάζας για εφαρμοζόμενα προβλήματα θα έπρεπε να είναι απλό και ακριβές. Μερικές ελπίδες για το σχεδιασμό τέτοιων σχημάτων στηρίχτηκαν σε αναλυτικές λύσεις σταθερών εξισώσεων για μεταφορές μέσα στη φυλλική επιφάνεια. Δυστυχώς αυτή η ελπίδα δεν βγήκε αληθινή: οι προτεινόμενες λύσεις ήταν μάλλον προβληματικές.

Έτσι για τα περισσότερα τέτοια σχήματα, η βιομάζα του φυτού  $T_p$  ορίζονταν σαν σταθερή και  $T_s$  και  $q_s$  σαν συναρτήσεις του  $z$ . Βέβαια οι διαφορές οι οποίες καθορίζουν τη συχνότητα της ανταλλαγής φυτικής βιομάζας-αέρα στην περίπτωση αυτή, δεν θα μπορούσαν να υπολογιστούν με αρκετή ασφάλεια.

Οι πιο πολλοί ειδικοί φαίνεται να υποστηρίζουν την ιδέα ότι ο λογικός τρόπος να απλοποιήσεις το πρόβλημα της ανταλλαγής ενέργειας και μάζας θα ήταν να εγκαταλείψεις τον κατακόρυφο συντονισμό της φυλλικής επιφάνειας, διατηρώντας το για το έδαφος, όπως το μοντέλο αναζήτησης πρέπει να είναι ένα στατικό μοντέλο, του απλού στρώματος για το μέσο αέρα

και ένα όχι στατικό, πολυστρωματικό μοντέλο για το μέσο έδαφος. Το πιο γνωστό σχέδιο αυτού του τύπου σχεδιάστηκε υπό την εποπτεία των Budagovsky και Sirotenko. Το ακόλουθο σετ εξισώσεων ισορροπίας αποτελεί τη βάση για το σχέδιο υπολογισμού:

$$\begin{aligned} XE_p &= R_p - H_p, \\ XE_s &= R_s - H_s - G_s, \\ Q_R &= E_p \end{aligned} \quad (6-14)$$

Το σετ των παραπάνω εξισώσεων (17) περιγράφει την διαδικασία ανταλλαγής ενέργειας και μάζας σε μιας σταθερής κατάστασης προσέγγιση. Η πρώτη εξ' αυτών είναι το ισοζύγιο θερμότητας στη φυλλική επιφάνεια, η δεύτερη είναι το ισοζύγιο θερμότητας της επιφάνειας του εδάφους και η τρίτη είναι για το ισοζύγιο νερού του φυτού.

Οι εκφράσεις για τη ροή θερμότητας και νερού μπορούν να γραφτούν ως εξής:

$$H_p = (1-K) \rho C_p T_p - T_s / r_a \quad (6-15)$$

$$H_s = K \rho C_p T_s - T_a / r_a \quad (6-16)$$

$$E_p = (1-K) \rho (q_p - q_a) / r_a - r_{st} \quad (6-17)$$

$$E_s = K \rho q_s - q_a / r_a - r_{st} \quad (6-18)$$

Οι τιμές αντίστασης υπολογίζονται στη βάση της ημιεμπειρικής φόρμουλας εξαρτώμενες από το δυναμικό του νερού του φυτού, εδαφική υγρασία και ταχύτητα του αέρα πάνω από την καλλιέργεια αντίστοιχα.

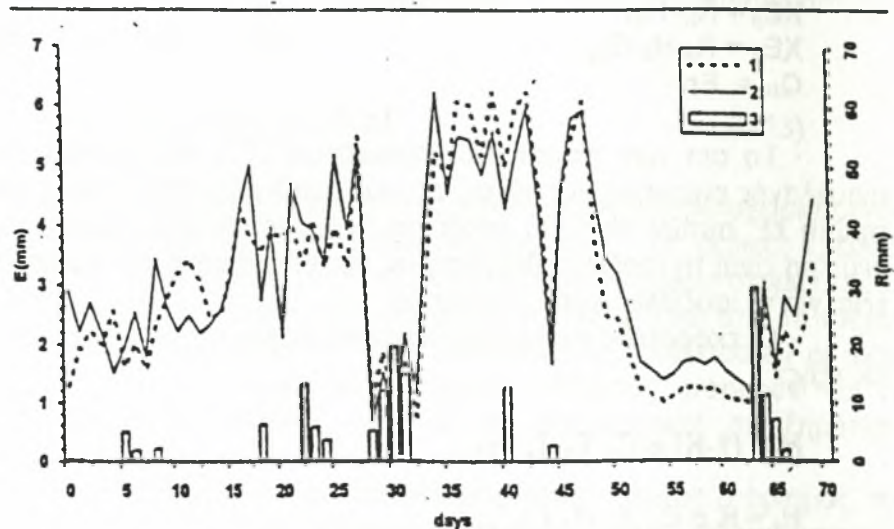
$K = 0,7^L$  όπου  $L$  ο δείκτης φυλλικής επιφάνειας.

Αν και το σετ εξισώσεων (6-14) είναι μη γραμμικές, η χρήση της γραμμικοποίησης για το νόμο Stefan- Boltzman και τον τύπο Magnus επιτρέπει στο να βρεθεί η αναλυτική του λύση.

Για να ακολουθήσει κανείς τον τύπο προσομοίωσης χρειάζεται να ξέρει κανείς τις μέγιστες και ελάχιστες θερμοκρασίες αέρα, μέσο ημερήσιο έλλειμμα υγρασίας αέρα, ταχύτητα αέρα στις 15:00 ώρα, και ημερήσιες ώρες ηλιοφάνειας. Για να αρχίσει η προσομοίωση η εδαφική υγρασία που περιέχεται ανά στρώμα, η φυτική βιομάζα σε τμήματα ξηρής μάζας και το βάρος των φυτών ορίζονται για την αρχική ημέρα. Απαιτείται επίσης η γνώση των υδροφυσιολογικών χαρακτηριστικών του εδάφους.

Το μοντέλο ρυθμίστηκε για τα σιτηρά. Ελέγχθηκε για τα πιο ακριβή εμπειρικά δεδομένα που είναι διαθέσιμα, Οι μετρήσεις πάρθηκαν στο μεγάλης κλίμακας υδραυλικό εδαφικό στρώμα της λίμνης Valday για μια καλλιεργητική περίοδο 70 ημερών ανοιξιάτικου κριθαριού. Οι δυναμικές ενεργής και προσομοιωμένης ημερήσιας εξατμισοδιαπνοής για την περίοδο από 18 Μαΐου (εμφάνιση) μέχρι 26 Ιουλίου (ωριμότητα) για το ανοιξιάτικο κριθάρι φαίνεται στο σχήμα 6.1.





**Σχήμα 6.1** Δυναμική της πραγματικής (1) και προσομοιωμένης (2) εξατμισοδιαπνοής  $E$  και βροχόπτωσης  $R$  για το διάστημα 18 Μαΐου – 26 Ιουλίου 1973

Ο συντελεστής συσχέτισης μεταξύ μετρημένων και προσομοιωμένων τιμών ήταν 0,91. Η καλύτερη μέθοδος για τον υπολογισμό εξατμισοδιαπνοής, βασισμένη στην ισορροπία θερμότητας και σχεδιασμένη απ' τον Kharchenko, επιτρέπει μια εγκυρότητα υπολογισμού 28% για μηνιαίες και για 10ήμερες τιμές. Το σφάλμα της παραπάνω μεθόδου είναι το μισό, όντας αντίστοιχα 11 και 16 %. Τα αποτελέσματα που πάρθηκαν δείχνουν ότι αυτή η μέθοδος έχει μεγαλύτερη δυναμική, παρόλα αυτά πρέπει να ελεγχθεί με επιπρόσθετα πειραματικά δεδομένα.

Ένας εύκολος για χρήση τύπος προσομοίωσης θα μπορούσε να δημιουργηθεί, υποθέτοντας ότι η ροή θερμότητας μέσα στο έδαφος είναι μια μόνιμη συνάρτηση του ισοζυγίου της ακτινοβολίας.

Ένα πιο σύνθετο μοντέλο σχεδιάστηκε, χωρίς αυτή την υπόθεση, λαμβάνοντας υπόψη την ημερήσια πορεία της διαδικασίας ανταλλαγής ενέργειας και μάζας. Μια σύγκριση των αποτελεσμάτων προσομοίωσης, λαμβανόμενα με το πιο απλό μοντέλο και το πιο πολύπλοκο βασιζόμενα στα δεδομένα εξατμισοδιαπνοής στο κριθάρι στη λεκάνη της λίμνης Valday έδειξε ότι η χρήση δεδομένων ανταλλαγής ενέργειας και μάζας για κάθε ώρα δεν βελτιώνει την ασφάλεια της προσομοίωσης.

Το παραπάνω συμπέρασμα δείχνει ότι υπάρχει ένα κύριο όριο του οποίου η παραβίαση θα μπορούσε να επιδράσει στη μείωση της



αποτελεσματικότητας του μοντέλου σαν εργαλείο για τη μείωση εφαρμοσμένων προβλημάτων.

### 6.1.5 Προσομοίωση παραγωγής φυτού

6.1.5.1 **Αύξηση φυτού.** Ένα φυσικο-μαθηματικό πρόβλημα ίσως είναι χωρισμένο σε δύο στάδια: προσομοίωση ανταλλαγής ενέργειας και μάζας στο φυτό και προσομοίωση παραγωγής φυτού. Προσεγγίσεις για την επίλυση του δεύτερου μέρους του προβλήματος- μαθηματική περιγραφή της αύξησης και ανάπτυξης φυτού- έχουν αναπτυχθεί λίγο πιο διεξοδικά από τα μοντέλα ανταλλαγής ενέργειας και μάζας. Έτσι στο σχεδιασμό αυτών των μοντέλων κάποιος πρέπει να στηριχθεί πάνω σε απλές ιδέες οδηγώντας σε ποιοτική γενίκευση των αποτελεσμάτων των πειραμάτων, παρά σε περιοριστικούς όρους φυσικής.

Ο Ivanov(1946) ήταν ο πρώτος που πρότεινε μια εξίσωση ισοζυγίου για να συνδέσει την φωτοσύνθεση με αναπνοή και παραγωγή ολικού ξηρού βάρους. Ο Ross(1966,1967) ξεκίνησε το παρόν στάδιο ανάπτυξης σε μαθηματική προσομοίωση αύξησης φυτού όταν πρότεινε ένα σετ εξισώσεων που χρησίμευαν σαν βάση για το σχεδιασμό πιλοτικών δυναμικών μοντέλων για παραγωγή φυτού:

$$Ddm/dt = \epsilon_{\phi} \sum_{i=1}^4 A_{ij} \Phi_{ci} - \epsilon_R R_{ci} - V_j + M \sum_{i=1}^4 B_{ij} \quad (6-19)$$

όπου i, k, j είναι φυτικά όργανα (φύλλα, κορμός, ρίζες και αναπαραγωγικά όργανα)

$m_j$  είναι η ξηρή μάζα j-th οργάνων

$\epsilon_{\phi}, \epsilon_R$  είναι οι αποτελεσματικοί δείκτες φωτοσύνθεσης και αναπνοής

$\Phi_{ci}, R_{ci}$  είναι η ολική ημερήσια φωτοσύνθεση και αναπνοή αντίστοιχα

$V_j$  είναι η ξηρή φυτική βιομάζα που χάνεται κάθε μέρα εξαιτίας της πτώσης των φύλλων

$M$  η ολική φυτική ξηρή μάζα

$A_{ij}$  είναι η συνάρτηση της ημερήσιας παραγωγής των j-th οργάνων σε "φρέσκα" αφομοιώσιμα εξαγόμενα σε 24 ώρες

$B_{ij}$  είναι η ανταλλαγή "παλιών" αφομοιώσιμων συστατικών μεταξύ των i-th και j-th οργάνων, σχετιζόμενα με 1 γρ. της ολικής ξηρής μάζας.

$A_{ij}$  και  $B_{ij}$  παρουσιάζονται σαν "μήτρες αύξησης"

Κατά τη διάρκεια της περιόδου αύξησης όταν τα φύλλα δρουν σαν τα κύρια κέντρα αύξησης, η χρήση αποτελείται από τις συναρτήσεις  $A_j$  όταν οι συναρτήσεις εισαγομένων- εξαγομένων  $B_j$  χρησιμοποιούνται κατά τη διάρκεια της αναπαραγωγικής περιόδου. Οι Sepp και Tooming(1982) τροποποίησαν την εξίσωση που γράφτηκε από τον Ross ως:

$$\frac{\Delta m_i}{\Delta t} = \epsilon A_i(t) \left[ \int_0^{L_i(t)} (\Phi_i - R_i) dL dT - \sum_{i=2}^n R_c \right] + M B_j, \quad (6-20)$$

Έχει γίνει μια προσπάθεια να βελτιωθούν οι συναρτήσεις αύξησης του Ross και έχει προταθεί να υπολογίζονται σε σχέση με την πάνω από το έδαφος παραγωγή φυτομάζας παρά με την παραγωγή ολικής βιομάζας. Ιδανικές καμπύλες έχουν σχεδιαστεί για συναρτήσεις φυτικής αύξησης των φύλλων, στελεχών και "ωτίων" σιτηρών σε σχέση με την άνω του εδάφους παραγωγή βιομάζας, η οποία κατά τη γνώμη του συγγραφέα δεν βασίζεται σε περιβαλλοντικές συνθήκες.

Οι Galyamin και Siptits προσπάθησαν να υπολογίσουν την εξάρτηση της συνάρτησης αύξησης ρίζας από το σύστημα νερού και το περιεχόμενο αζώτου στο έδαφος με τη βοήθεια μη γραμμικής εξίσωσης παλινδρόμησης.

Για να απλοποιήσει τον καθορισμό και εφαρμογή συναρτήσεων αύξησης η Abashina (1974) πρότεινε να παρουσιάζονται εκθετικά. Ο Polevoy (1983) συσχέτισε συναρτήσεις αύξησης με αποτελεσματικές θερμοκρασίες και ημέρες και χρησιμοποίησε σαν βάση για τον καθορισμό τους, μια τριών παραμέτρων λογιστική καμπύλη δυναμικής παραγωγής φυτικής βιομάζας.

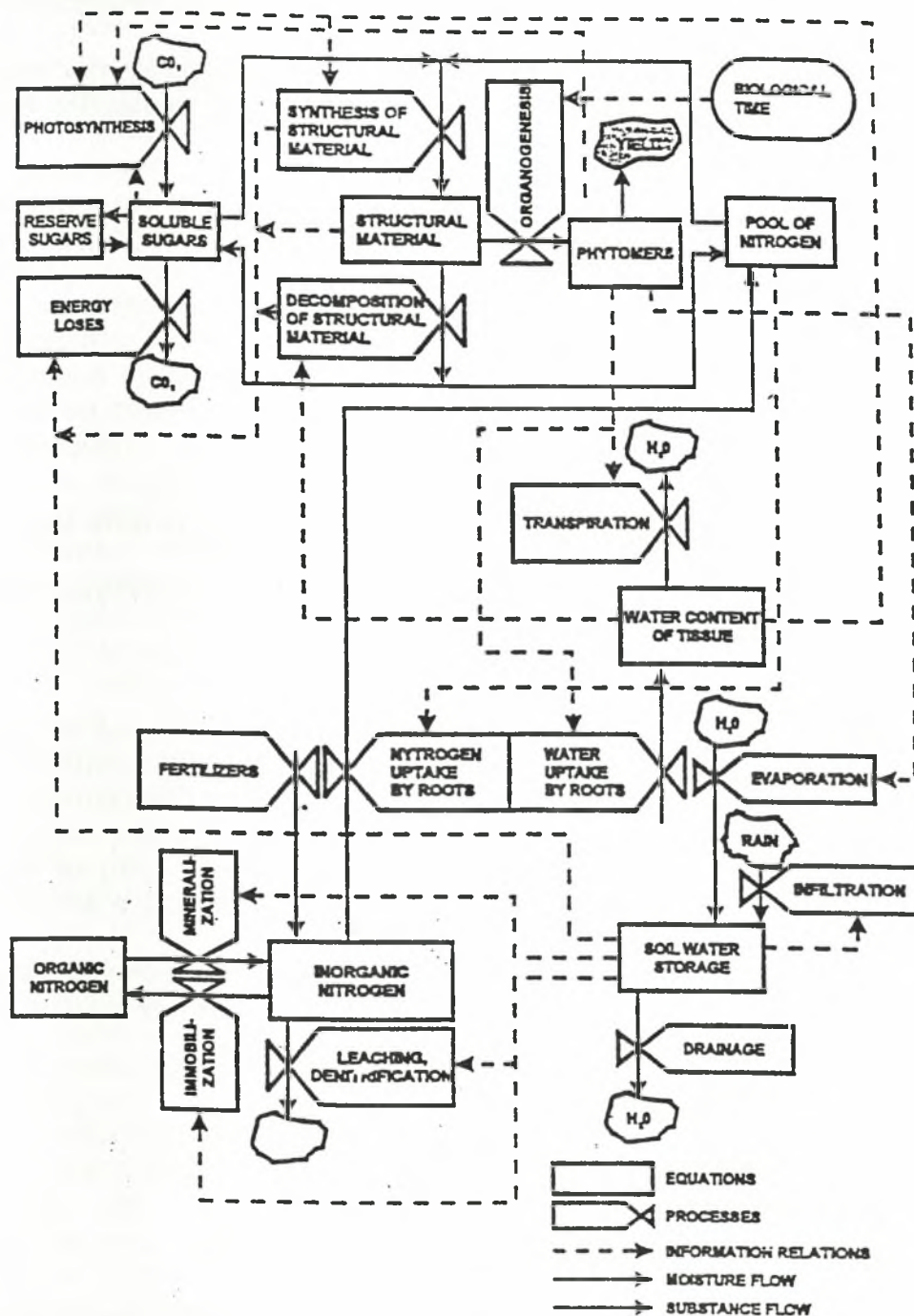
Η μέθοδος συνάρτησης αύξησης είναι ευρέως σε χρήση λόγω της απλότητάς της και εξαιτίας του ότι παρουσιάζει μια ευκαιρία για να αποκτήσει πλεονέκτημα των βασικών βιομετρικών μετρήσεων. Ο σημαντικός περιορισμός του: πειραματικά δεδομένα χρησιμοποιούνται για την κατασκευή του μοντέλου που είναι σχεδιασμένο στην ουσία να καθορίζει σχέσεις για τα ίδια πειραματικά δεδομένα. Η χρήση περισσότερο ή λιγότερο αυστηρά προκαθορισμένων συναρτήσεων αύξησης περιορίζει την πιθανότητα προσομοίωσης της ανταπόκρισης του φυτού σε περιβαλλοντικές συνθήκες.

Ο τύπος του μοντέλου, στο οποίο ο διαχωρισμός και ανακατανομή εύπλαστων υλικών στην οντογένεση του φυτού σχηματίζεται στη βάση τρεχουσών απαιτήσεων και ο προσφερόμενος λόγος ίσως αναφέρεται σαν αυτορρυθμιζόμενος να διακρίνει τέτοια μοντέλα. Η αύξηση προσομοιώνεται σε τέτοια μοντέλα χρησιμοποιώντας την αποδοχή της δεξαμενής διατήρησης διαθέσιμων αφομοιώσιμων συστατικών. Το μοντέλο αποτελείται από δύο μέρη (στελέχη και ρίζες) και ο ρυθμός ροής διατηρημένων υδατανθράκων μεταξύ αυτών υποτίθεται ότι είναι αναλογικός με τη διαφοροποίηση της συγκέντρωσης υδρογονανθράκων.

Οι Sirotenko και Abashina (1985) εμφανίζονταν να παρουσιάζουν το πιο πλήρες μοντέλο στην κατηγορία των αυτορρυθμιζόμενων. Η ξηρή φυτική βιομάζα ( $m$ ) διαιρείται σε τέσσερα περιεχόμενα: διαλυτά σάκχαρα ( $mc$ ), αποθέματα υδρογονανθράκων ( $ms$ ), κινητά αποθέματα αζώτου ( $mN$ ), και δομική ύλη ( $mg$ ):

$$m = mc + ms + mN + mg \quad (6-21)$$

Το σχήμα 6.2. παρουσιάζει μια τυποποιημένη μορφή των κύριων φυσιολογικών σχέσεων του φυτού. Το διάγραμμα περιέχει δυο πηγές διατήρησης διαλυτών σακχάρων- φωτοσύνθεση και διάσπαση δομικών υλικών- και δύο sinks-απώλειες υδρογονανθράκων για τη σύνθεση νέων δομών και διασταύρωση όλων των απαιτήσεων σε ενέργεια των οργανισμών. Επιπροσθέτως το διάγραμμα ορίζει τις διαδικασίες των διαλυτών σακχάρων που συμβαίνουν κανονικά να κατευθύνονται στις πηγές διατήρησης υδρογονανθράκων και το αντίστροφο.



**Σχήμα 6.2** Διάγραμμα σχέσεων των διαδικασιών ανταλλαγής μάζας και ενέργειας προσομοιωμένο με την χρήση διαφορετικών εξισώσεων.



Ο κύκλος αζώτου του φυτού ορίζεται με πιο απλό τρόπο, επειδή οι ουσίες που περιέχουν άζωτο παίζουν το ρόλο δομικών υλικών και δεν μπορούν την ίδια ώρα να δράσουν σαν ενεργειακός προμηθευτής (όπως κάνουν οι υδρογονάνθρακες).

Αυτές οι θεωρήσεις επιτρέπουν την περιγραφή των συστατικών μερών της φυτικής βιομάζας που γίνεται με τις ακόλουθες διαφορικές εξισώσεις:

$$d(mc)/dt = v_1\Phi - v_2(G-Q) + K_{sc} ms - K_{sc} mc - D \quad (6-22)$$

$$d(ms)/dt = K_{cs} mc - K_{sc} ms \quad (6-23)$$

$$d(mN)/dt = P - v_3(G-Q) \quad (6-24)$$

$$d(mg_{ij})/dt = G_{ij} - Q_{ij} \quad (6-25)$$

όπου  $\Phi$  = η ολική φωτοσύνθεση

$G$  = ο ρυθμός παραγωγής δομικής βιομάζας σε ένα φυτό που αυξάνει

$Q$  = ο ρυθμός διάσπασης δομικών υλικών

$D$  = η ολική απώλεια υδρογονανθράκων κατά την αναπνοή για τις ενεργειακές απαιτήσεις των φυτών

$P$  = ο ρυθμός πρόσληψης αζώτου από ρίζες

$K_{cs}, K_{sc}$  = σταθερές

$i$  = ο αριθμός των groups όπου ένα συγκεκριμένο φυτικό όργανο ανήκει

$j$  = ο αριθμός του οργάνου του φυτού κατά τη σειρά εμφάνισης.

Οι εξισώσεις 6-22 ως 6-24 παρουσιάζουν τη δυναμική των διαλυτών σακχάρων, διατηρημένων υδρογονανθράκων και τις πηγές κινητού αζώτου αντίστοιχα, και το υποσύστημα (6-25) παρουσιάζει τη δυναμική της δομικής βιομάζας των ατομικών οργάνων του φυτού των οποίων ο αριθμός αλλάζει στην οντογένεση.

Για ανοιξιάτικο σιτάρι, του οποίου το μοντέλο ίσως είναι προσαρμοσμένο, οι ακόλουθες ομάδες φυτών- οργάνων ίσως μπορούν να διακριθούν:

- 1) πυρήνας
- 2) ζεύγη από γόνιμες ρίζες
- 3) στελέχη
- 4) "αυτιά"
- 5) φύλλα των κυρίων βλαστών
- 6) φύλλα του δευτερογενούς βλαστού

Στις περισσότερες των περιπτώσεων, ο αριθμός των εξισώσεων που πρέπει να εξισώσουν τον ολικό αριθμό οργάνων σ' ένα μέσο φυτό, θα ήταν μεγαλύτερος από μερικές δωδεκάδες.

Η ανάπτυξη του φυτού προσομοιώνεται με το σχεδιασμό ενός αλγορίθμου προσδιορίζοντας το χρόνο "ανοίγματος" και "κλεισίματος" κάθε εξίσωσης στο υποσύστημα (6-25). Σ' αυτό το σημείο, η συνάρτηση  $\lambda(t)$  έχει σχεδιαστεί και χαρακτηρίζει τόσο καλά τις διαδικασίες αύξησης που παρέχονται με τις ουσίες που απαιτούνται. Η παραγωγή ριζών και βλασταρίων συνδέεται με την συνθήκη:  $\lambda(t) \geq \lambda_{max}$ .



Ένας απλός κανόνας εφαρμόζεται για να καθορίσει το πότε κάθε επόμενο φύλλο είναι έτοιμο ν' αρχίσει ν' αυξάνει – το επόμενο φύλλο στη σειρά θ' αρχίσει ν' αυξάνει μόνο όταν το προηγούμενο έχει αλλάξει από εισαγόμενα σε εξαγόμενα αφομοιώσιμες ουσίες, με τους ρυθμούς εξαγωγής να είναι μεγαλύτεροι απ' το χαμηλότερο επίπεδο.

Έτσι ο αριθμός των οργάνων του φυτού σ' αυτό το μοντέλο δεν αυξάνει μονοτονικά. Καθώς εμφανίζονται τα νέα όργανα, εκείνα τα οποία παρήχθησαν νωρίτερα πεθαίνουν. Για να καθοριστεί η ώρα που ένα όργανο πεθαίνει, η σχέση αποτελείται από το βαθμό διάσπασης της δομικής βιομάζας που εκφράζεται σαν ρυθμός τρέχουσας δομικής βιομάζας  $m_{ij}$  στη μέγιστη. Ένα όργανο πεθαίνει όσο γρηγορότερα αυτός ο ρυθμός πέφτει κάτω από ένα προκαθορισμένο κριτικό επίπεδο. Ένας απλός κανόνας χρησιμοποιείται για τον καθορισμό της στιγμής που ένα όργανο "κιτρινίζει", όπως η ώρα που η φωτοσύνθεση σταματά.

Ο Gulayev πρότεινε ένα σχετικό διάγραμμα για το ολικό ρυθμιστικό σύστημα του φυτού. Για την προσομοίωση των αναπαραγωγικών περιόδων ανάπτυξης πρότεινε δύο στάδια. Στο πρώτο στάδιο τα βασικά στοιχεία των αναπαραγωγικών οργάνων παίρνουν μορφή και έχει γίνει η αυτορρύθμιση της δυναμικής ικανότητας ενός αναπαραγωγικού οργάνου σύμφωνα με τη διαθέσιμη φωτοσυνθετική δυνατότητα του φυτού.

Στο δεύτερο στάδιο η βιομάζα του πυρήνα αυξάνει και το τελικό βάρος θα καθοριστεί από τη διάθεση σε "νέα" αφομοιώσιμα να υποστηρίξουν το δυναμικό ρυθμό συσσώρευσης βιομάζας του σιτηρού και από το άθροισμα των αποθεμάτων στα φυτικά όργανα.

Η φιλολογία γύρω από την προσομοίωση της φωτοσύνθεσης και της φωτοαναπνοής είναι αρκετά πλούσια-το θέμα συζητιέται πρακτικά σε όλες τις μονογραφίες στις μαθηματικές προσομοιώσεις. Το αξιοσημείωτο είναι ότι στα καλύτερα αναπτυσσόμενα δυναμικά μοντέλα η ανταλλαγή αερίου διοξειδίου του άνθρακα ενός φύλλου προσομοιώνεται με τη βοήθεια πολύ γνωστών ημιεμπειρικών τύπων του Chartier.

Για να χρησιμοποιηθεί ο τύπος του Chartier στα αυτορρυθμιζόμενα δυναμικά μοντέλα, πρέπει να υπολογιστεί μια συμπληρωματική σχέση μεταξύ του φωτοσυνθετικού ρυθμού και της αφομοίωσης του περιεχομένου του φυλλώματος των φυτών (σαν μια προσέγγιση πειραματικών δεδομένων βρίσκεται στους Bikhle et al. το 1980).

Ο Laisk (1977) ανέπτυξε ένα γνήσιο μαθηματικό μοντέλο του κύκλου του Calvin. Με μαθηματική ανάλυση η κινητική του φωτοσυνθετικού πεντοφωσφορικού κύκλου βρέθηκε σε ποια στάδια του κύκλου θα περιέχονταν οριακές απαντήσεις κάτω από διαφορετικές περιβαλλοντικές συνθήκες. Η κινητική της αναπνοής υπολογίζεται με μια υπόθεση ότι το διοξείδιο του άνθρακα και το οξυγόνο ανταγωνίζονται για τον υποδοχέα ριβουλοσεδιφωσφόρου. Το μοντέλο του Laisk αποτελείται από ένα επεξηγηματικό τύπο και φαίνεται να είναι αρκετά πολύπλοκο για να χρησιμοποιηθεί σαν δυναμικό μοντέλο.

Αν θεωρηθεί ότι η χωρίς φως αναπνοή είναι μέρος της παραγωγής του φυτού τότε πρέπει στις εξισώσεις της αναπνοής να λαμβάνονται υπόψη οι απώλειες για αναπνοή που συνδέονται με δομική αύξηση και διατήρηση. Η αναπνοή αντιμετωπιζόταν σαν συνάρτηση της ολικής φωτοσύνθεσης του φυτού και της ξηρής μάζας ή του φυλλώματος μόνο. Κάποιοι μελετητές ασχολήθηκαν με την εύρεση της τιμής της παραμέτρου στην προσομοίωση

αναπνοής για διαφορετικά επίπεδα προσφερόμενου αζώτου. Οι συγγραφείς συμπεραίνουν ότι κάτω από μεγάλη επάρκεια αζώτου η τιμή του δείκτη διατήρησης της αναπνοής ρυθμιζόμενη με την ξηρή βιομάζα θα αύξανε, όπου ο δείκτης ρυθμιζόμενος με την πρωτεΐνη θα μειωνόταν.

Μελέτες που έγιναν από τους Semikhatova et al. (1979), Moldau (1984) για το ρόλο της διατήρησης προσαρμοστικών δομών των φυτών σε χαμηλότερες θερμοκρασίες και έλλειψη νερού εισήγαγαν τον κανόνα ότι οι απώλειες για τη διατήρηση της αναπνοής είναι μεγαλύτερες για αντίξοες καιρικές συνθήκες.

Τα άγρια είδη σιταριού, κεχριού, σόργου και βαμβακιού ήταν αποδεδειγμένα μπροστά σε σχέση με τις μοντέρνες ποικιλίες σε συνθήκες μέγιστου ρυθμού ανταλλαγής CO<sub>2</sub> σε φως, για κάθε κομμάτι της φυλλικής επιφάνειας.

Η κατανόηση αυτού του γεγονότος, παρείχε μια τεράστια επίδραση στην ανάπτυξη μαθηματικών προσομοιώσεων της παραγωγής. Ο ρυθμός αύξησης του φυτού και η παραγωγικότητα, καθώς ίσως είναι κάτω από φωτοσυνθετικά μη ευνοϊκές συνθήκες, δεν μπορούν πραγματικά να εξάγουν ένα βασικό όριο όταν οι συνθήκες γίνουν καλύτερες. Αυτό το όριο εμφανίζεται να καθορίζεται από τις διαδικασίες της αύξησης. Έτσι φαίνεται να είναι το όριο αυτό πιθανό κάτω από συνθήκες μη ευνοϊκές για την αύξηση των φυτών αν και κανονικές για ευνοϊκή φωτοσύνθεση.

Ο ρόλος της φωτοαναπνοής πρέπει να μελετηθεί κάτω από συνθήκες όπου ο εφοδιασμός με άνθρακα είναι οριακός, η μείωση του αποτελεσματικού φωτοσυνθετικού ρυθμού, είναι τόση όσο το ένα τρίτο εξαιτίας της φωτοαναπνοής και εμφανίζεται να καθυστερεί το ρυθμό αύξησης αν οι διαδικασίες αύξησης είναι οριακές, τότε η φωτοαναπνοή μόλις και μπορεί να έχει μια αντίθετη επίδραση στην παραγωγικότητα του φυτού.

Φαίνεται ότι οι σχεδιαστές του μοντέλου θα έπρεπε να ενθαρρυνθούν να μετατοπίσουν την προσοχή τους από την απλή περιγραφή παρατηρούμενων σχέσεων μεταξύ της ανταλλαγής αερίου CO<sub>2</sub> και των περιβαλλοντικών παραγόντων, προς την απόκτηση μιας άποψης των μηχανισμών για την ολοκλήρωση των φυσιολογικών διαδικασιών όλου του φυτού.

### 6.1.6 Εφαρμοζόμενα Δυναμικά Μοντέλα και η Χρήση τους

Ένα από τα πρώτα δυναμικά μοντέλα για την παραγωγή φυτών αναπτύχθηκαν για εφαρμογές διαχείρισης εδάφους και νερού και για αγρομετεωρολογική χρήση. Για παράδειγμα, μια εξ' αυτών είναι το μοντέλο που σχεδιάστηκε από τον Sirotenko με την Abashina και είναι μια ομάδα συμβατικών διαφορικών εξισώσεων, όπως:

$$dm_p/dt = G_p - D_p - q_p - P_p \quad (6-26)$$

$$dW_i/dt = q_{i-1} - q_i - TR_i - \sigma_i E_s \quad (6-27)$$

$$dN_k/dt = H_k + U - h_k + V_{k-1} - A_k \quad (6-28)$$

Αυτή η μαθηματική δομή προσφέρεται σαν βάση για την ανάπτυξη ενός αριθμού εκδόσεων μοντέλων. Αυτό παρουσιάζει ένα κομμάτι για το

άζωτο και τον υπολογισμό της επαναλαμβανόμενης χρήσης των υδατανθράκων που εξαγονται από τους μεγαλύτερους σε ηλικία φυτικούς ιστούς. Συνηθισμένα αποκτούμενα δεδομένα καιρού χρησιμοποιούνται σαν εισαγόμενα του μοντέλου; θερμοκρασία, έλλειψη υγρασίας αέρα, ώρες ηλιοφάνειας και η ολική ημερήσια βροχόπτωση. Το μοντέλο "τρέχει" με χρονικό βήμα μιας ημέρας.

Το μοντέλο τροποποιήθηκε για ανοιξιάτικο κριθάρι, ανοιξιάτικο και χειμερινό σιτάρι, πατάτα, τομάτα, πράσινο μπιζέλι, μηδική, καλαμπόκι και ηλίανθο. Το μοντέλο των σιτηρών ελέγχθηκε για ένα πλατύ εύρος εδαφικών και κλιματικών συνθηκών. Η επάρκεια του μοντέλου ίσως πρέπει να εκτιμηθεί χρησιμοποιώντας τα δεδομένα που φαίνονται στο σχήμα 6.3. Το σχήμα 6.3 δείχνει ότι το μοντέλο είναι ικανό να ελέγξει αρκετά καλά τις δυναμικές των καλλιεργήσιμων περιοχών εδάφους- νερού για εδάφη διαφορετικής προέλευσης.

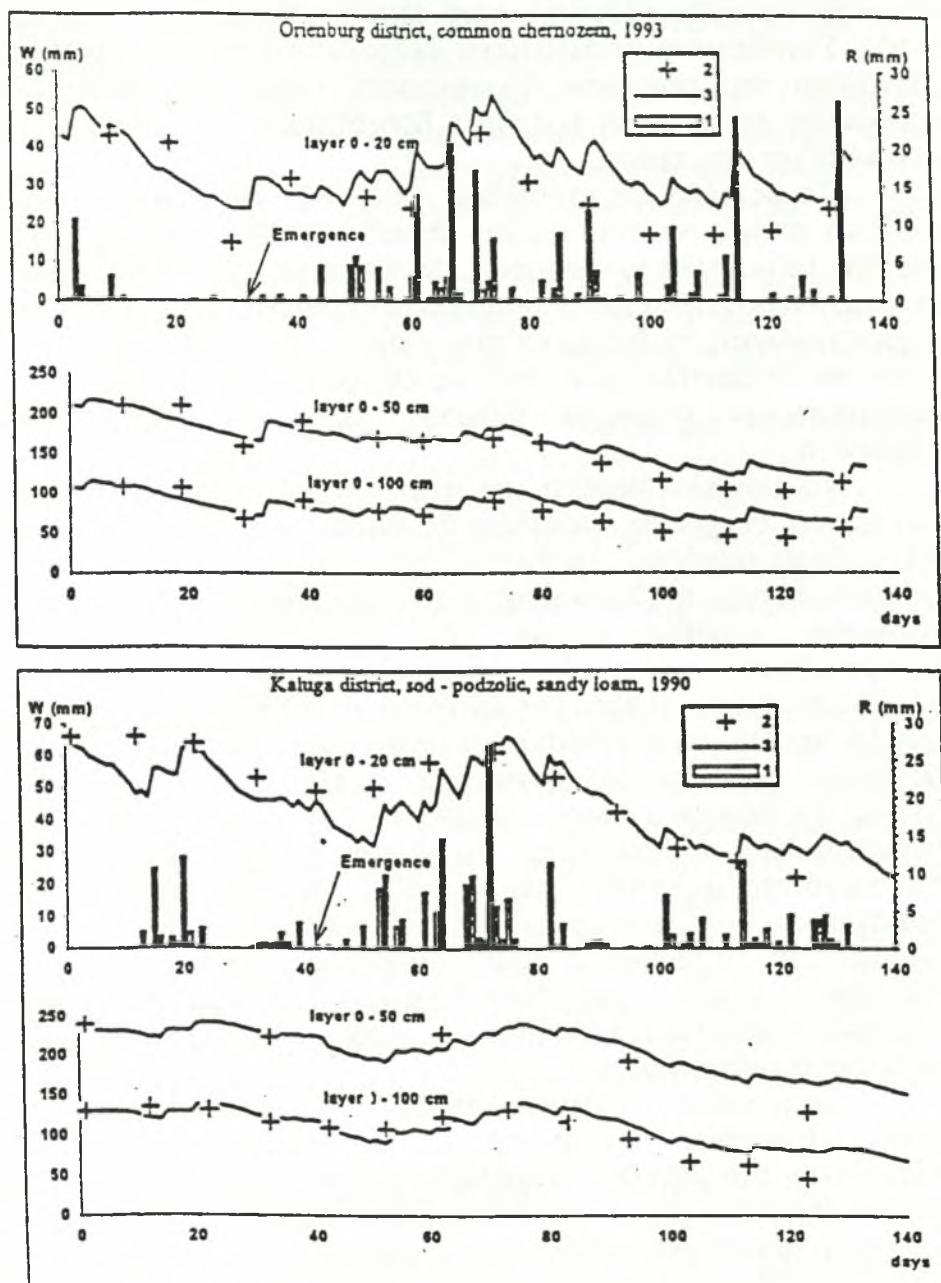
Το μοντέλο παρέχει μια ικανοποιητική προσομοίωση σημαντικής, από χρονιά σε χρονιά, ποικιλότητας παραγωγής ανοιξιάτικων σιτηρών σε τυπικές ξηρές συνθήκες. Ανεπαρκείς παρατηρήσεις αγρού είναι διαθέσιμες για την πιστοποίηση της εγκυρότητας του κομματιού για το άζωτο, αν και το επιλεγμένο μοντέλο ελέγχει τα επιτυχημένα αποτελέσματα που παρουσιάζονται.

Παρακάτω γίνεται μια αναφορά σε κάποια δυναμικά μοντέλα. Το μοντέλο του Galyamin (1980) αναπτύχθηκε για εφαρμογές άρδευσης και για ανοιξιάτικο σιτάρι και καλαμπόκι. Το μοντέλο τρέχει με χρονικό βήμα 1 ημέρας. Το βιολογικό μέρος στηρίζεται σε λειτουργίες αύξησης. Μετρήσεις παίρνονται από το "σύστημα" θερμότητας και επιδράσεις εδαφικού νερού στη συχνότητα ανάπτυξης του φυτού. Το μοντέλο στερείται ένα κομμάτι υπολογισμού των δυναμικών του εδαφικού νερού και το κομμάτι της δυναμικής για το διαθέσιμο άζωτο στο έδαφος. Επιπροσθέτως στα καιρικά δεδομένα το μοντέλο χρειάζεται 10-ήμερα δεδομένα στο 1 μέτρο βάθος εδαφικού στρώματος περιεχομένου νερού, που κάνει το μοντέλο στην εφαρμογή αμφισβητήσιμο.

Το μοντέλο του Polevoy(1983) δομικά μοιάζει με του Galyamin. Οι βασικές θεωρήσεις του τρόπου με τον οποίο οι λειτουργίες αύξησης καθορίζονται στο μοντέλο περιγράφονται παραπάνω. Μια άλλη διάκριση είναι χρονικό βήμα 10 ημερών μειώνοντας δραματικά το κόστος προπαρασκευής των εισαγόμενων μετεωρολογικών στοιχείων. Έτσι, σε τέτοια περίπτωση η φυσικά βασιζόμενη ερμηνεία των παραμέτρων του μοντέλου γίνεται προβληματική και το μοντέλο απαιτεί μια αποκλειστικά εντοπιζόμενη φύση.

Οι Sepp και Tooming(1982) σχεδίασαν το δυναμικό μοντέλο της παραγωγής πατάτας POMOD. Αυτό το μοντέλο ως διαφοροποίηση απ' το μοντέλο CROP-WEATHER-3, έχει ένα καλύτερο κομμάτι ανάπτυξης για τον υπολογισμό της ακτινοβολίας της καλλιέργειας αν και είναι σημαντικά κατώτερο στις συνθήκες της λεπτομερούς περιγραφής της κατάστασης του νερού στην καλλιέργεια. Η φωτοσύνθεση προσομοιάζεται σε ένα χρονικό βήμα 1 ώρας και η βιομάζα σε βήμα 1 ημέρας. Η εγκυρότητα του μοντέλου υπολογίστηκε ελεγχόμενο για μεγάλου χρόνου συλλεγόμενα δεδομένα σε διάφορες αγρομετεωρολογικές καταστάσεις:





Σχήμα 6.3 Μετρήσεις και υπολογισμοί εδαφικής υγρασίας (W) σε στρώματα 0-20 cm, 0-50 cm και 0-100 cm



Πίνακας 6.1 Δυναμική της πρόγνωσης παραγωγής για δύο χρόνια (1977-1978) σε υπολογισμένες καιρικές συνθήκες.

Table 2. Dynamics of predicted crop yields and estimates for spring wheat growth and development (% of normal) in 1977-1978, calculated from date for Ershov agrometeorological station, Saratov District														
		Final date of periods estimated												
Year	Index	Emergence	May 10	May 20	May 31	June 10	June 20	June 30	July 10	July 20	July 31	Harvest:		
1977	Yield (g ha <sup>-1</sup> )	13.5	13.5	10.7	10.5	5.8	6.3	9.4	7.9	8.0	-	-	8.0	
	Estimates: 10-day periods	-	100	79	98	55	109	149	84	101	-	-	-	
	Current growing season	100	100	79	78	43	47	70	58	59	-	-	59	
	Current farming year	117	117	93	91	50	55	82	69	70	-	-	70	
1978	Yield (g ha <sup>-1</sup> )	16.1	-	16.5	16.8	16.9	15.7	17.0	20.3	21.5	23.3	23.2		
	Estimates: 10-day periods	-	-	102	102	101	93	108	119	106	108	-		
	Current growing season	100	-	102	104	105	97	106	126	133	145	144		
	Current farming year	140	-	143	146	147	137	148	177	187	203	202		

$$Y_k = y / y_k \cdot 100\% \quad (6-29)$$

$Y_k$  οι υπολογιζόμενες καιρικές συνθήκες

$y, y_k$  οι παραγωγές που υπολογίζονται απ' τις υπολογιζόμενες ενεργές περιόδους και τα αναφερόμενα δεδομένα αντίστοιχα.

Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η  $Y_k$  σαν απόκλιση από τις δύο υπολογίσιμες τιμές είναι πρακτικά ανεξάρτητη του τρόπου που οι μελλοντικές μετεωρολογικές συνθήκες έχουν προσδιοριστεί. Αυτό το κάνει πιθανό να διαχωρίσει το έργο του υπολογισμού απ' την ασφάλεια της πρόγνωσης παραγωγής.

Οι κορυφαίες γραμμές του Πίνακα 6.1 παρουσιάζουν την δυναμική της πρόγνωσης παραγωγής για δύο χρόνια: υπολογισμένες καιρικές συνθήκες δίνονται κάτω από την παραγωγή. Ο πίνακας 6.1. δείχνει ότι το 1977 ο καιρός (περιλαμβάνοντας τον προηγούμενο χειμώνα και φθινόπωρο) σε συνθήκες ευνοϊκές στο ανοιξιάτικο σιτάρι ήταν 70% του κανονικού, συγκρινόμενα με το 202% του 1978. Η περίοδος αύξησης υπολογίζεται ως 59% για το 1977 και 144% για το 1978 αντίστοιχα. Το 1977 οι καιρικές συνθήκες για τον Μάιο 11-20 και Ιούνιο 0-10 ήταν ειδικά ακραίες: η αναμενόμενη παραγωγή μειώθηκε κατά 21 και 45% αντίστοιχα γι' αυτές τις δύο 10ήμερες περιόδους.

Μια απλή υπολογιστική προσέγγιση δεν χρησιμοποιείται μόνο για τα αποτελέσματα ολοκληρώσιμων μετεωρολογικών συνθηκών, αλλά ακόμη για απεικόνιση του ρόλου των επιλεγμένων περιβαλλοντικών παραγόντων. Ένα δυναμικό μοντέλο αυτού του τύπου ίσως χρησιμοποιείται σαν ένα είδος μέτρησης, ολοκληρώνοντας τα αποτελέσματα των συνθηκών του περιβάλλοντος του φυτού στην παραγωγικότητα του φυτού.

### 6.1.7 Πρόγνωση παραγωγής φυτών με δυναμικά μοντέλα

Όταν δυναμικά μοντέλα χρησιμοποιούνται για την απόκτηση πρόγνωσης παραγωγής, μεγάλου χρόνου δεδομένα καιρού χρησιμοποιούνται αντί των αγνώστων τιμών των μελλοντικών καιρικών συνθηκών. Η χρήση δυναμικών μοντέλων για υπολογισμό παραγωγής βασιζόμενη στην επιλογή του καιρού στο μέλλον, έχει οδηγήσει σε σημαντικό βαθμό απογοήτευσης. Η ασφάλεια για τον υπολογισμό παραγωγής που αποκτήθηκε με αυτό τον τρόπο, δεν φαινόταν να έχει καμιά ουσιώδη βελτίωση σε σύγκριση με τα συμβατικά σχήματα παλινδρόμησης.

Πρέπει να σημειωθεί ότι ο τρόπος που θα καθορίζεται ο καιρός στο μέλλον μπορεί να παίξει αποφασιστικό ρόλο. Επειδή τα δυναμικά μοντέλα είναι μη γραμμικά, η χρήση ομαλοποιημένων "normals" σαν πρόγνωση οδηγεί σε διαφορετικούς υπολογισμούς της παραγωγής.

Για να εξουδετερωθεί μια τέτοια επίδραση, προτάθηκε ένα μοντέλο κάνοντας χρήση της προσέγγισης Monte-Carlo. Το μοντέλο παρουσιάζει μεγάλης κλίμακας στατιστικές σχέσεις, υπολογίζοντας σχέσεις αυτό- και cross συσχέτισης των ημερήσιων τιμών της ηλιακής ακτινοβολίας, θερμοκρασίας και υγρασίας αέρα. Χρησιμοποιείται ανάλυση για να συνδυάσει το χρόνο βροχόπτωσης με την ποικιλότητα άλλων μετεωρολογικών τιμών.

Οι Sirotenko και Abashina (1995) σύγκριναν διαφορετικούς τρόπους καθορισμού των μελλοντικών καιρικών δεδομένων για την απόκτηση δυναμικών προγνώσεων στηριζόμενων σε μοντέλα παραγωγής.

Χρησιμοποιώντας δεδομένα για 31 χρόνια παραγωγές σιτηρών υπολογίστηκαν καθορίζοντας μέσες μεγάλης διάρκειας τιμές, τα δεδομένα για κάθε χρόνο απ' το διαθέσιμο δείγμα και απλά τελικά δεδομένα από έναν ανάλογο χρόνο βασισμένα στις τρέχουσες συνθήκες του χρόνου. Οι συντελεστές συσχέτισης μεταξύ των σειρών παραγωγής υπολογίστηκαν κάνοντας χρήση αυτής της προσέγγισης και οι σειρές παραγωγής υπολογιζόμενες απ' τα πραγματικά δεδομένα ήταν 0,76 0,80 και 0,83 αντίστοιχα. Έτσι φαίνεται να προτιμάται η χρήση της αναλογικής προσέγγισης για τον καθορισμού του καιρού στο μέλλον. Τέτοιο ήταν το αποτέλεσμα της ανάπτυξης ενός συστήματος βασισμένο σε υπολογισμό για πρόγνωση παραγωγής μηδικής.

### 6.1.7.1 Διαχείριση της φυτικής παραγωγής

Κάθε χρόνο το έργο της διαχείρισης της παραγωγής γίνεται ολοένα και πιο αναγκαίο εξαιτίας των απαιτήσεων να σωθούν πηγές και περιβαλλοντικές παράμετροι, των οποίων η σημασία αυξάνει όσο η γεωργία γίνεται πιο εντατική. Δυναμικά μοντέλα (συστήματα συμβατικών διαφορικών εξισώσεων) βοηθούν στην απόκτηση ενός σωστού μαθηματικά προσδιορισμού για προβλήματα διαχείρισης φυτού. Σ' αυτήν την εργασία χρησιμοποιείται ένα παράδειγμα υπολογισμού του πιο ευνοϊκού σχεδίου άρδευσης που σχεδιάστηκε απ' τον Galyamin (1980) όπως ακολουθεί:

Ο Galyamin προσδιόρισε τη διακριτική συνάρτηση  $\varphi(t)$ ,  $t$  ανήκει στο  $[T, T]$  ικανοποιώντας τους περιορισμούς:

$$\sum \varphi(t) \leq \Phi \quad \text{και} \quad 0 \leq \varphi(t) \leq \varphi^0 \quad \text{έτσι ώστε} \quad m(t) \rightarrow \max,$$

όπου  $\Phi$  είναι η κανονική τιμή άρδευσης π.χ. το ολικό ποσό νερού που ελευθερώνεται στο χρόνο  $t$ -τα στον αρδευόμενο αγρό,  
 $\varphi^0$  είναι το μέγιστο ημερήσιο ποσό νερού,

$T, T$  είναι οι ημέρες φυτρώματος και συγκομιδής αντίστοιχα.

Ο Sirotenko (1987) παρουσίασε το optimum πρόβλημα άρδευσης χρησιμοποιώντας άλλο προσδιορισμό. Προσδιόρισε τη συνάρτηση  $\varphi(t)$ , όπου το  $t$  ανήκει στο  $[T, T]$  ικανοποιώντας τους περιορισμούς:

$$0 \leq \varphi(t) \leq \varphi^0 \quad \text{και} \quad m(t) = m_0 \quad \text{έτσι ώστε} \quad \sum \varphi(t) \rightarrow \min$$

Ο πρώτος προσδιορισμός του προβλήματος ορίζει ότι μπορεί να βρεθεί μια κατάσταση άρδευσης η οποία θα μεγιστοποιούσε την παραγωγή κάτω από προκαθορισμένο μοντέλο άρδευσης, όταν το δεύτερο ορίζει ότι θα έπρεπε να παρατηρηθεί μια ελάχιστη άρδευση για την απόκτηση του προκαθορισμένου επιπέδου παραγωγής.

Μια μεταγενέστερη άποψη φαίνεται να είναι προτιμητέα λαμβάνοντας υπόψη τις περιβαλλοντικές παραμέτρους. Το σχήμα 6.4 δείχνει την ελάχιστη άρδευση που βρέθηκε για τρία επίπεδα παραγωγής σιταριού. Στα

περιγραφόμενα επίπεδα παραγωγής των 2 και 3,5 t/ha το νερό εφαρμόζεται μόνο κατά τη διάρκεια κριτικών περιόδων - όταν σχηματίζονται παραγωγικά φυτικά όργανα.

Αυτή η μέθοδος δεν μπορεί να εγγυηθεί σίγουρη λύση. Η Shlyachkova (1991) περιγράφει την ακριβή λύση ενός προβλήματος optimum αγροτικής διαχείρισης, μεγιστοποιώντας την συνάρτηση και παρουσιάζοντας την συσσωρευμένη ολική φυτική βιομάζα. Σ' αυτό το σημείο η αρχή Pontryagin είναι σε χρήση, η οποία δίνει μια πλήρη λύση του προβλήματος για ένα απλοποιημένο μοντέλο αγροοικοσυστήματος.

### 6.1.7.2 Υπολογισμός εδαφικών και κλιματικών πηγών

Η ανάπτυξη μαθηματικών μοντέλων αγροτικής παραγωγής έχει οδηγήσει σε αναθεώρηση των μεθόδων υπολογισμού φυσικού εδάφους και κλιματικών πηγών. Ο Tooming ήταν ο πρώτος που αμέσως χρησιμοποίησε αυτές τις νέες ευκαιρίες και πρότεινε μια μέθοδο, κάνοντας σύγκριση:

- της δυναμικής παραγωγής (PY),
- της πραγματικά δυνατής παραγωγής (APY) και
- της συγκομιζόμενης παραγωγής.

Η PY είναι ορισμένη σαν η παραγωγή κάτω από ιδεώδεις καιρικές συνθήκες καθορισμένη από το εισαγόμενο PAR και τα βιολογικά χαρακτηριστικά της καλλιέργειας. APY είναι η πιθανή μέγιστη παραγωγή κάτω από πραγματικές καιρικές συνθήκες. Τα PY και APY αποκτιούνται κάτω από ιδεώδεις εδαφικές συνθήκες. Αυτή η ιδέα έχει χρησιμοποιηθεί από διάφορους συγγραφείς με διάφορες τροποποιήσεις.

Έτσι, όπως τονίστηκε, PY είναι μια θεωρητική ιδέα επειδή δεν είναι ακόμη ξεκάθαρο ποιες μετεωρολογικές συνθήκες θα έπρεπε να τις αποδεχθούμε σαν ιδεώδεις για την παραγωγή της καλλιέργειας. Για να γίνει η παραπάνω προσέγγιση πιο ειδική, προτάθηκε ένα σύστημα ενδεικτικής παραγωγής.

Η προσομοίωση έγινε με απλό τρόπο: το NY υπολογίζεται χρησιμοποιώντας τα πραγματικά ημερήσια δεδομένα για εδαφικό νερό και περιεχόμενου του αζώτου στο εδαφικό διάλυμα. Για τον υπολογισμό του SDY, οι τρέχουσες τιμές της συγκέντρωσης αζώτου αντικαθίστανται από optimum τιμές. Τέλος το MPY υπολογίζεται χρησιμοποιώντας πραγματικά δεδομένα καιρού και optimum τιμές εδαφικού νερού και αζώτου.

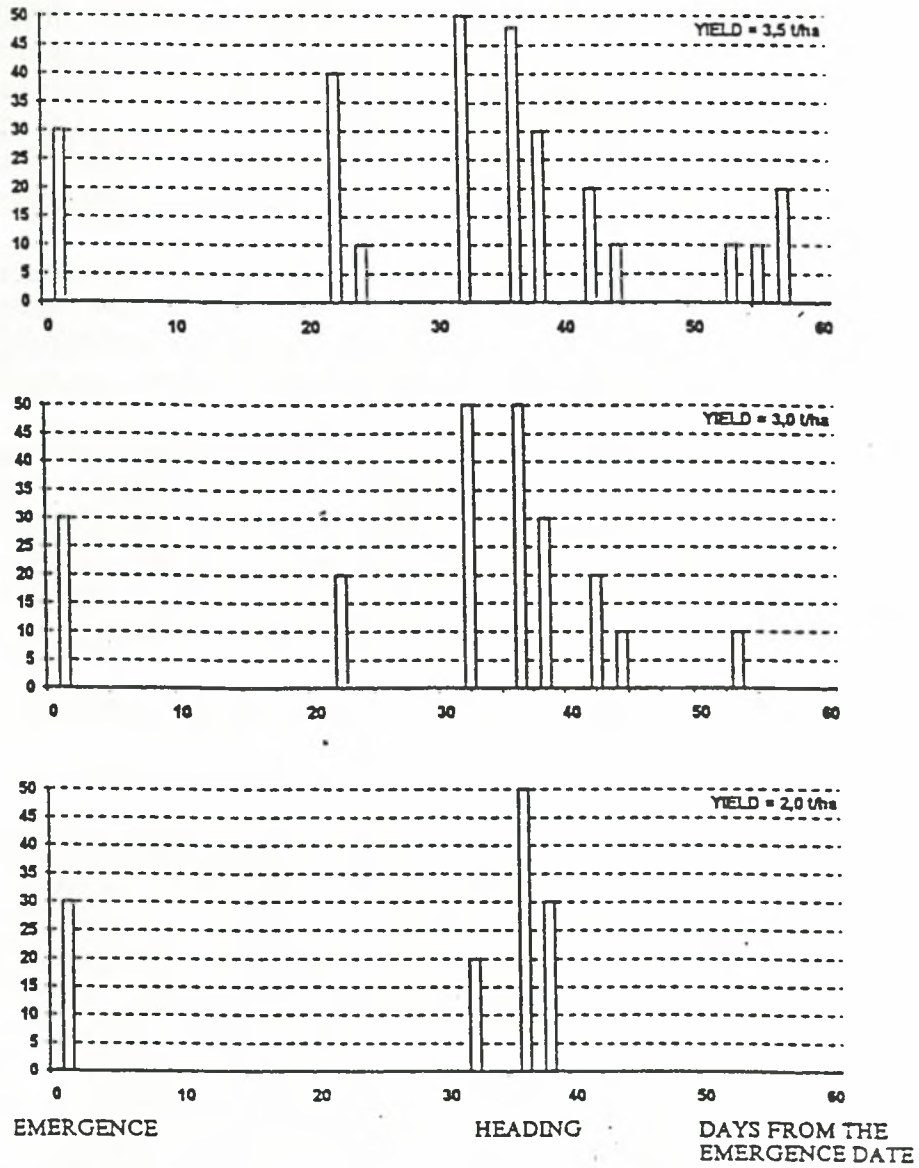
Ο παρακάτω πίνακας δείχνει τα αποτελέσματα του υπολογισμού τεσσάρων επιπέδων παραγωγής ανοιξιάτικου σιταριού για το στην Ρωσία.

Reference yield	NY	SDY	CDY	MPY
Yield (tha <sup>-1</sup> )	2,6	3,6	2,8	3,9

Έτσι η οπτιμοποίηση του συστήματος του νερού θα αύξανε την παραγωγή κατά 1t ha<sup>-1</sup> (SDY-NY), το διαθέσιμο άζωτο κατά 0,2 t ha<sup>-1</sup> (CDY-NY) και τα δύο μαζί κατά 1,3 t ha<sup>-1</sup> (MPY-NY).



Rates of irrigation (mm)



**Σχήμα 6.4** Ελάχιστη άρδευση που βρέθηκε για τρία επίπεδα παραγωγής σιταριού

Γίνεται αντιληπτό ότι η αύξηση εξαιτίας της ολοκληρώσιμης οπτιμοποίησης του συστήματος του νερού και των θρεπτικών θα ήταν  $0,1 \text{ t ha}^{-1}$  μεγαλύτερη από το ολικό άθροισμα των επιδράσεων των ξεχωριστών οπτιμοποιήσεων, που ίσως οφείλεται στην αλληλεπίδραση των προσομοιωμένων παραγόντων.

Αυτό το συμπέρασμα επιβεβαιώθηκε απ' τα δεδομένα, προσομοιωμένα με έναν απλό τρόπο, στο βαθμό της χρήσης πηγών εδάφους και κλίματος της περιοχής. Η βιοκλιματική δυναμική του συστήματος θα μπορούσε να αυξήσει σημαντικά την οπτιμοποίηση της "κατάστασης" νερό και/ή της διάθεσης θρεπτικών στοιχείων. Σ' αυτή την περίπτωση η βιοκλιματική δυναμική ίσως χαρακτηριστεί από την τιμή ξηρής βιομάζας του υπέργειου τμήματος που παράγεται για την περίοδο με τη θερμοκρασία αέρα κάτω από τους  $5^\circ \text{C}$ .

Το σχήμα 6.5 περιέχει τα αποτελέσματα απλών προσομοιώσεων για τις αγροτικές περιοχές της πρώην ΕΣΣΔ. Οι προσομοιώσεις έγιναν χρησιμοποιώντας μέσες και μεγάλου χρόνου υδρομετεωρολογικές συνθήκες για επιλεγμένες περιοχές και τα αποτελέσματα βγήκαν για πάνω από 20 οικονομικές περιοχές.

Χρησιμοποιήθηκε το σύστημα προσομοίωσης Φυτό-Καιρός και τα δεδομένα που πινακοποιήθηκαν αποκτούν επιπλέον ανάλυση. Ο πίνακας 6.2 δείχνει πως η παραγωγικότητα μπορεί να αυξηθεί αλλάζοντας αγροτικές πρακτικές σε διαφορετικές γεωγραφικές περιοχές. Παρατηρήθηκε ότι:

1. Η μεγάλη διατήρηση αυξάνει σε παραγωγή κι αυτή η τεράστια πηγή αποθήκευσης είναι αυτή που θα είχε σαν αποτέλεσμα μεγαλύτερα επίπεδα παραγωγικότητας
2. Η οπτιμοποίηση θρέψης είναι ικανή να διπλασιάσει τη γεωργική παραγωγή,
3. Η οπτιμοποίηση του "συστήματος" νερού μπορεί να την αυξήσει κατά 1,5 φορές και τελικά
4. Η ολοκληρωμένη οπτιμοποίηση θα την τριπλασιάσει.

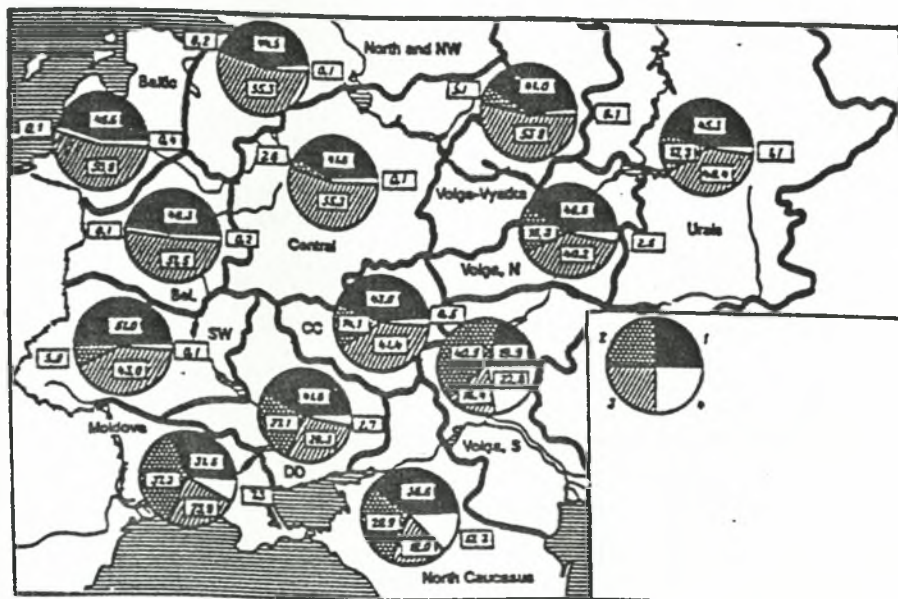
Το έργο υπολογισμού των επιδράσεων στην γεωργία της αλλαγής του κλίματος στο μέλλον, εμφανίζεται να είναι συνδεδεμένο με διάφορα στοιχεία. Παρά την τεράστια αύξηση στον αριθμό των δημοσιεύσεων, αυτό το πρόβλημα δεν έχει ακόμη λυθεί επαρκώς, εξαιτίας της αστάθειας και του υπερβολικού εμπειρισμού στα αναλυτικά εργαλεία που χρησιμοποιούνται.

Πρόοδος σ' αυτό το σημείο ίσως υπήρχε απ' την ανάπτυξη εθνικών και αργότερα παγκόσμιων συστημάτων προσομοίωσης βασιζόμενα σε μοντέλα παραγωγής φυτών και μεγάλες βάσεις δεδομένων. Ένα τέτοιο σύστημα για την περιοχή της πρώην ΕΣΣΔ δημιουργήθηκε στο Ινστιτούτο Αγροτικής Μετεωρολογίας στο Obninsk στην Ρωσία. Το σύστημα προσομοίωσης παρουσιάζεται στον πίνακα 6.3.

Για την ερμηνεία αποτελεσμάτων προσομοίωσης, παρατηρήθηκε ότι οι συνθήκες GFDL και UKMO υποθέτουν ότι οι καλοκαιρινές θερμοκρασίες αυξάνουν στη συγκεκριμένη περιοχή κατά  $5,2$  και  $4,2^\circ \text{C}$  αντίστοιχα, όπου απαντούν οι παλιόκλιματικές συνθήκες στο Eemian Interglacial (EI). Κάτω από τις συνθήκες GFDL και UKMO η βροχόπτωση θα είναι αντίστοιχα 15 και 25% μεγαλύτερη, αν και δεν μπορεί να αντισταθμιστεί από μεγαλύτερες απώλειες νερού λόγω εξάτμισης.

Πίνακας 6.2 Προσομοιωμένες τιμές υποθετικής παραγωγής σε διαφορετικές περιοχές της πρώην USSR.

Economic regions	Potential yields, t ha <sup>-1</sup>				Yield increase with optimization, t ha <sup>-1</sup>		
	MPY	CDY	SDY	NY	W	N	W, N
1. North, northwest	3.91	3.82	1.20	1.17	0.0	2.6	2.7
2. Central	4.16	3.66	1.53	1.41	0.1	2.3	2.8
3. Volga-Vyatka	3.92	3.22	1.41	1.30	0.1	1.9	2.6
4. Central Black Soil	4.27	2.73	1.94	1.29	0.6	1.4	3.0
5. North Volga	4.23	2.44	1.76	1.14	0.6	1.3	3.1
6. South Volga	3.75	1.27	1.99	0.81	1.2	0.5	3.0
7. N. Caucasus	3.84	2.12	2.52	1.66	0.8	0.5	2.2
8. Ural	4.46	2.64	2.14	1.31	0.8	1.3	3.1
9. SW Ukraine	4.96	4.22	2.62	2.32	0.3	1.9	2.6
10. Donetsk-Dnieper (Ukr.)	4.87	2.79	3.27	1.98	1.3	0.8	2.9
11. S. Ukraine, Moldova	5.49	2.86	3.51	1.95	1.6	0.9	3.6
12. Baltic	5.06	4.96	2.22	2.20	0.0	2.8	2.9
13. Byelorussia	4.91	4.74	2.33	2.33	0.0	2.4	2.6
European USSR	4.41	2.94	2.24	1.55	0.7	1.4	2.9
14. NW Kazakhstan	3.52	0.89	2.34	0.71	1.7	0.2	2.8
15. N. Kazakhstan	4.73	2.01	2.55	1.04	1.5	1.0	3.7
16. NE Kazakhstan	4.40	1.50	1.84	0.69	1.2	0.8	3.7
17. SW Western Siberia	4.10	2.92	2.11	1.39	0.7	1.5	2.7
18. SE Western Siberia	3.81	2.90	1.64	1.19	0.5	1.7	2.6
19. S. Krasnoyarsk	3.87	3.08	1.59	1.27	0.3	1.8	2.6
20. Far East	3.63	2.77	1.40	0.98	0.4	1.8	2.7
Asian USSR	4.16	2.36	2.02	1.07	1.0	1.3	3.1
USSR	4.34	2.77	2.18	1.41	0.8	1.4	2.9



Σχήμα 6.5 Αποτελέσματα απλών προσομοιώσεων για τις αγροτικές περιοχές της πρώην USSR.

**Πίνακας 6.3** Σύστημα προσομοίωσης βασιζόμενο σε μοντέλα παραγωγής φυτών και μεγάλες βάσεις δεδομένων για την περιοχή της πρώην ΕΣΣΔ

Economic regions	Modern yields t ha <sup>-1</sup>	GFDL		UKMO		EI	
		CO <sub>2</sub> × 1 (%)	CO <sub>2</sub> × 2 (%)	CO <sub>2</sub> × 1 (%)	CO <sub>2</sub> × 2 (%)	CO <sub>2</sub> × 1 (%)	CO <sub>2</sub> × 2 (%)
1. North, northwest	1.17	-25	20	-21	30	0	65
2. Central	1.41	-34	0	-30	9	0	53
3. Volga-Vyatka	1.30	-38	-5	-26	13	0	50
4. Central Black Soil	1.29	-46	-16	-36	-3	3	51
5. North Volga	1.14	-48	-20	-33	0	5	50
6. South Volga	0.81	-38	0	-31	10	17	79
7. N. Caucasus	1.66	-36	-6	-28	1	43	90
8. Ural	1.31	-48	-20	-37	-4	8	54
9. SW Ukraine	2.32	-41	-17	-36	-9	-2	39
10. Donets-Dnieper (Ukr.)	1.98	-41	-16	-32	-5	30	69
11. S. Ukraine, Moldova	1.95	-28	3	-21	11	53	106
12. Baltic	2.20	-23	10	-21	17	-8	38
13. Byelorussia	2.33	-36	-7	-33	-1	-4	37
European USSR	1.55	-39	-9	-31	2	13	61
14. NW Kazakhstan	0.71	-48	-11	-46	-6	28	93
15. N. Kazakhstan	1.04	-43	-10	-42	-8	18	72
16. NE Kazakhstan	0.69	-43	-5	-54	-22	8	69
17. SW Western Siberia	1.39	-35	-2	-40	-7	9	52
18. SE Western Siberia	1.19	-40	-4	-47	-15	3	55
19. S. Krasnoyarsk	1.27	-36	-2	-37	-5	-5	38
20. Far East	0.98	-34	5	-36	2	-2	55
Asian USSR	1.07	-40	-5	-43	-9	9	62
USSR	1.41	-40	-8	-35	-1	12	62

GFDL scenario, summertime temperatures increase by an average of 5.2 °C, rainfall increases by 15%.

UKMO scenario, summertime temperatures increase by an average of 4.2 °C, rainfall increase by 25%.

EI scenario, Eemian Interglacial, climate wetter and milder than at present.

CO<sub>2</sub> × 1, CO<sub>2</sub> levels at present-day values.

CO<sub>2</sub> × 2, CO<sub>2</sub> levels double present-day values.



Σε απάντηση στις αλλαγές στις κλιματικές συνθήκες, αλλαγές στην παραγωγή πρόκειται να συμβούν- κάτω από τις συνθήκες GFDL και UKMO θα είναι χαμηλότερη κατά 39 και 31% αντίστοιχα και 13% υψηλότερη για ΕΙ, επειδή το τελευταίο προϋποθέτει πιο ήπιο και υγρό καιρό. Άμεσα αποτελέσματα από την αύξηση του διοξειδίου του άνθρακα ίσως μειώνει τις απώλειες που αποδίδονται στη χειροτέρευση των κλιματικών συνθηκών.

## 6.2 Καταστατικά μοντέλα

Τα καταστατικά μοντέλα των τυχαίων διαδικασιών είναι βασισμένα στην ιδιότητα του Markov. Η παραπάνω ιδιότητα με απλά λόγια υποδηλώνει την ανεξαρτησία του μέλλοντος της μεθόδου από το παρελθόν της με καθορισμένο το παρόν στάδιο.

Με άλλα λόγια το πεδίο της διαδικασίας του Markov συνοψίζει όλες τις πληροφορίες από το παρελθόν οι οποίες είναι απαραίτητες για να προβλεφθεί το μέλλον της. Για φανερούς λόγους μόνο η περίπτωση στην οποία το διανυσματικό πεδίο είναι καθορισμένων διατάσεων παρουσιάζει πρακτικό ενδιαφέρον.

Ένα γενικό μοντέλο καταστατικού διανυσματικού πεδίου ( state vector model ) είναι τυπικά διαχωρισμένο σε στάδια των ακόλουθων πέντε ποσοτήτων (σχήμα 6.6) :

- 1) Τρία διανύσματα από αντίστοιχες εισαγόμενες, εξαγόμενες και εσωτερικού πεδίου μεταβλητές.
- 2) Έναν κανόνα για την μετατροπή του διανυσματικού πεδίου από το ένα χρονικό σημείο στο επόμενο.
- 3) Μια σχέση μεταξύ εισαγόμενων – εξαγόμενων και μεταβλητών πεδίου.
- 4) Το αρχικό στάδιο.
- 5) Τον συνδυασμό των στατιστικών στοιχείων όλων των τυχαίων μεταβλητών.

Μαθηματικά οι παραπάνω εκφράσεις μπορούν να διατυπωθούν ως εξής :

$$x(t+1) = f(x(t), u(t), \theta, t) + w(t) \quad (6-30)$$

$$y(t) = h(x(t), u(t), \theta, t) + v(t) \quad (6-31)$$

$$t=1,2,3,4,\dots$$

Όπου  $x(t)$  είναι  $n \times 1$  διανυσματικό πεδίο

$u(t)$  είναι  $rx \times 1$  εισαγόμενο διάνυσμα

$w(t)$  είναι  $qx \times 1$  διαδικασία γνωστού διανύσματος

$\theta$  είναι  $m \times 1$  διανυσματική παράμετρος

$y(t)$  είναι  $rx \times 1$  εξαγόμενο διάνυσμα

τα  $w(t)$  και  $v(t)$  υπολογίστηκαν να είναι ασυσχέτιστες αλληλουχίες του προβλέψιμου σφάλματος με γνωστή κατανομή. Παρομοίως η κατανομή του  $x(0)$  υπολογίστηκε ότι είναι γνωστή.

Όλα τα μαθηματικά μοντέλα συμπεριλαμβανόμενων και των διαστημικού πεδίου μοντέλων είναι μόνο μια προσέγγιση της πραγματικότητας.

Ένας αριθμός μοντέλων που χρησιμοποιούνται στις εκτιμήσεις πεδίου και στην πρόγνωση μπορούν να διατυπωθούν με την φόρμα των εξισώσεων 6-30 και 6-31.

Το πεδίο  $x(t)$  έχει φυσική σημασία στην περίπτωση όπου το μοντέλο είναι φυσικό ή θεωρητικό. Στα μοντέλα μαύρου κουτιού καθώς και στα μοντέλα χρονικών σειρών το πεδίο δεν είναι απαραίτητο να έχει φυσική σημασία. Παρ'όλα αυτά στην διαδικασία του Markov ακόμα κατέχει μια θεωρητική μαθηματική σημασία.

Η γραμμική φόρμα των εξισώσεων 6-30 και 6-31, γνωστή σαν μοντέλο των Gauss και Markov, είναι ειδικής σημασίας και είναι γραμμένη ως εξής :

$$X(t+1) = \Phi x(t) + G u(t) + \Gamma w(t) \quad (6-32)$$

$$Y(t) = H x(t) + v(t) \quad (6-33)$$

$$t = 0, 1, 2, 3, \dots$$

Όπου  $w(t)$  και  $v(t)$  υπολογίσθηκαν να είναι white noise (GWN) αλληλουχίες του Gauss με μηδενικό μέσο και συμμεταβλητές  $Q$  και  $R$ . Το αρχικό στάδιο  $x(0)$  είναι κανονικά διανεμημένο με μέσο  $x_0$  και συμμεταβλητή  $P_0$ . Οι μήτρες  $\Phi$ ,  $G$ ,  $H$ ,  $\Gamma$ ,  $Q$ ,  $R$ , και  $P_0$  είναι προσδιοριστικές αλλά μπορεί να παραλλάσσουν χρονικά.

Το κύριο πλεονέκτημα της παρουσίασης των εξισώσεων 6-32 και 6-33 είναι ότι το μέσο των συναρτήσεων συμμεταβολής και συσχέτισης για τα  $x(t)$  και  $y(t)$  μπορεί να υπολογισθεί περιοδικά επαναλαμβανόμενα με την λύση μιας ομάδας διαφορικών εξισώσεων πρώτης προσέγγισης.

Επίσης η μεταγενέστερη κατανομή  $p(x(t) / y(t), y(t-1), \dots, y(1))$  τείνει να γίνει κατανομή Gauss και τα δυο πρώτα χρονικά σημεία υπολογίσθηκαν περιοδικά επαναλαμβανόμενα από τα Kalman Filter.

### 6.2.1 Διαδικασία και μέτρηση σφάλματος

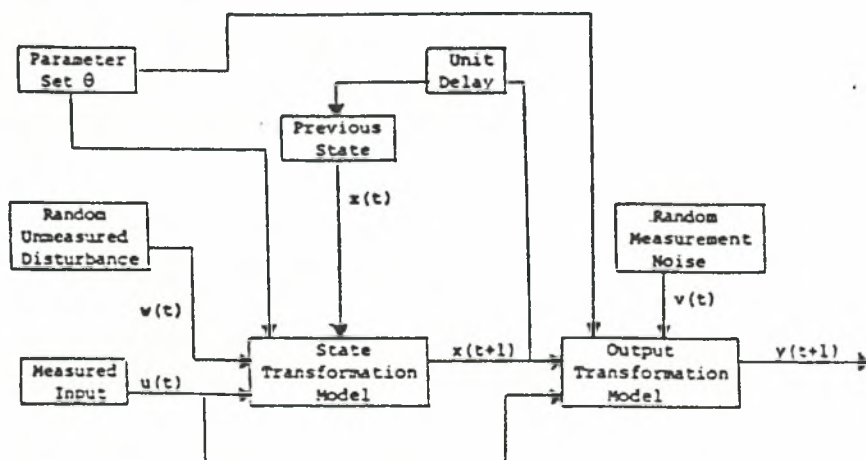
Το καταστατικό μοντέλο που περιγράφεται στις εξισώσεις 6-32 και 6-33 περιέχει δυο όρους προβλέψιμου σφάλματος,

- διαδικασία προβλέψιμου σφάλματος  $w(t)$  και
- μέτρηση προβλέψιμου σφάλματος  $v(t)$

Αυτά φυσικά έχουν αρκετά μεγάλη διάφορα στις ερμηνείες και τις επιδράσεις τους. Το  $v(t)$  αντιπροσωπεύει τα σφάλματα που είναι σύμφυτα με την παρατήρηση του πραγματικού πεδίου του συστήματος  $x(t)$ . Το  $w(t)$  αντιπροσωπεύει τυχαίες δονήσεις κατά την διάρκεια της εξέλιξης του συστήματος  $x(t)$ .

Αν παραληφθεί το  $v(t)$  και υποτεθεί, για τον συγκεκριμένο χρόνο, ότι όλες οι μεταβλητές του πεδίου μπορούν να παρατηρηθούν, δηλαδή  $y(t) = x(t)$ , καθώς και ότι όλες οι μήτρες είναι χρονικά αμετάβλητες, τότε η εξίσωση 6.32 μπορεί να γράφει ως εξής :

$$y(t+1) = \Phi y(t) + G u(t) + \Gamma w(t) \quad (6-34)$$



Σχήμα 6.6 Δομή καταστατικών μοντέλων

Η εξίσωση 6-34 είναι πρώτης προσέγγισης αυτοπαλινδρομική διαδικασία, με εισαγόμενα  $u(t)$  και τυχαία λάθη  $w(t)$ . Τέτοιου είδους μοντέλα έχουν ήδη χρησιμοποιηθεί από την Υδρολογία.

Συμπεριλαμβανομένης της περίπτωσης στην οποία δεν υπάρχει διαδικασία προβλέψιμου σφάλματος, το  $w(t) = 0$ , και το αρχικό στάδιο  $x(0)$  είναι απολύτως γνωστά. Δίνοντας  $\{u(t)\}$ , η  $\{x(t)\}$  διαδικασία είναι προσδιοριστική και η εξίσωση 6-33 αντιπροσωπεύει ένα signal plus noise μοντέλο. Το πρόβλημα της πρόγνωσης, σε αυτή την περίπτωση, αποτελείται βασικά από τον διαχωρισμό του signal από το προβλέψιμο σφάλμα. Πρέπει όμως να σημειωθεί ότι αυτή η καλή ερμηνεία μπορεί να μην είναι σωστή εάν το  $y(t) = x(t) + v(t)$  έχει αντικατασταθεί στην απόδοση της εξίσωσης 6-32.

$$y(t+1) = \Phi y(t) + Gu(t) + (v(t+1) - \Phi v(t)) \quad (6-35)$$

Η παραπάνω εξίσωση αντιπροσωπεύει γενικά ένα διανυσματικό, πρώτης προσέγγισης και αυτοπαλινδρομικής κίνησης του μέσου όρου του, μοντέλο (Autoregressive Moving Average - ARMA). Ο ίδιος τύπος του μοντέλου, λαμβάνεται υπ'όψη, ακόμα και όταν η  $w(t)$  περίοδος κρατήθηκε στο μοντέλο. Παρακάτω παρουσιάζονται τρία παραδείγματα του τύπου του διανυσματικού πεδίου.

### 6.2.2 Παλινδρομικό μοντέλο μεταβλητού χρόνου

Συμπεριλαμβάνει ένα μεταβλητού χρόνου παλινδρομικό μοντέλο με το  $d(t)$  ως εξαρτημένη μεταβλητή και  $z_1(t), \dots, z_m(t)$  σαν ανεξάρτητες μεταβλητές.

$$d(t) = \sum_{i=1}^m d_i(t) z_i(t) + n(t) \quad (6-36)$$

Προχωρώντας ακόμη παραπέρα και υπολογίζοντας ότι η χρονική μεταβολή του καθενός από τους συντελεστές παλινδρόμησης μπορεί να περιγραφεί από ένα μοντέλο επιπέδου πρώτης προσέγγισης, τότε:

$$a_i(t+1) = a_i(t) + \xi_i(t) \quad (6-37) \\ i = 1, 2, 3, \dots, m$$

Οι εξισώσεις (6-36) και (6-37) μπορούν να εκφραστούν με τον τύπο των εξισώσεων (6-32) και (6-33), με τον προσδιορισμό των :

$$\begin{aligned} y(t) &= d(t) \\ n(t) &= v(t) \\ x^T(t) &= [a_1(t), \dots, a_m(t)] \quad , \quad G=0, \Gamma=I \\ H(t) &= [z_1(t), \dots, z_m(t)] \end{aligned} \quad \Phi = \begin{bmatrix} a_1 & a_2 & \dots & 0 \\ 0 & & & a_m \end{bmatrix} \quad v(t) = \begin{bmatrix} \xi_1(t) \\ \vdots \\ \xi_n(t) \end{bmatrix}$$

Μοντέλα αυτού του τύπου έχουν χρησιμοποιηθεί από τον Takeuchi (1976), για πρόγνωση κυκλώνων καθώς και από τους Mehra και Bohlin για άλλες δραστηριότητες.



### 6.2.3 Μεταβλητό μοντέλο με πιθανότητα σφάλματος ( EVM ) και συσχέτιση ανεξάρτητων μεταβλητών.

Αν υποθεθεί ότι στην εξίσωση (6-36) οι ανεξάρτητες μεταβλητές  $z_i(t)$  μπορούν να παρατηρηθούν μόνο ως  $b_i(t)$  με λάθη  $e_i(t)$  τότε:

$$b_i(t) = z_i(t) + e_i(t) \quad (6-38)$$

$$i = 1, 2, 3, \dots, m$$

Στην συνέχεια υποθέτοντας και πάλι ότι το  $z_i(t)$  μπορεί να μοντελοποιηθεί σαν ένα μοντέλο Markov, επιπέδου πρώτης προσέγγισης τότε:

$$z_i(t+1) = \varphi_i z_i(t) + \zeta_i(t) \quad (6-39)$$

Το μοντέλο των εξισώσεων (6-36), (6-38) και (6-39) μπορεί να γραφεί σαν ένα γραμμικό μοντέλο διανυσματικού πεδίου του τύπου των εξισώσεων (6-32) και (6-33) για την περίπτωση συνεχών συντελεστών. Επίσης για την περίπτωση μεταβλητού χρόνου μπορεί να γραφεί σαν μη γραμμικό μοντέλο του τύπου των εξισώσεων (6-30) και (6-31).

Το διανυσματικό πεδίο στην τελευταία περίπτωση αποτελείται από τα  $(z_1(t), \dots, z_m(t), \text{ και } a_1(t), \dots, a_m(t))$ . Η εξέλιξη της εξίσωσης (6-30) είναι γραμμική και στις δυο περιπτώσεις αλλά η εξαγόμενη εξίσωση στην περίπτωση μεταβολής του χρόνου αναμιγνύει παράγωγα των πεδίων.

### 6.2 4 Φυσικά και εννοιολογικά μοντέλα

Σε μηχανικά και ηλεκτρικά συστήματα, οι γνωστοί φυσικοί νόμοι όπως ο δεύτερος νόμος του Newton και οι εξισώσεις του Kirchhoff εξασφαλίζουν μια ομάδα συνηθισμένων διαφορικών εξισώσεων για το σύστημα.

Τα διαστημικού πεδίου μοντέλα λαμβάνονται εύκολα από αυτές τις διαφορικές εξισώσεις με την μετατροπή διαφορικών εξισώσεων υψηλότερης προσέγγισης, σε ένα διανυσματικό πεδίο διαφορικών εξισώσεων πρώτης προσέγγισης.

Ένα παράδειγμα του πως τα εννοιολογικά μοντέλα μπορούν να μετατραπούν σε διανυσματικού πεδίου μοντέλα δόθηκε από τους Ledsham και Staelin το 1977. Οι παραπάνω ερευνητές συμπεριέλαβαν το πρόβλημα της εκτίμησης της κατατομής της ατμοσφαιρικής θερμοκρασίας, από δεδομένα δορυφορικών εικόνων, σε συχνότητες μικροκυμάτων.

Το διανυσματικό πεδίο του μοντέλου αποτελείται από τις θερμοκρασιακές αποκλίσεις από το κλιματολογικό μέσο, σε δεκαπέντε υποχρεωτικά επίπεδα συμπεριλαμβανομένης και της επιφάνειας.

Συνολικά η κλιματολογία και τα συνοπτικά δεδομένα, χρησιμοποιήθηκαν για να συνδέσουν τις θερμοκρασιακές αποκλίσεις σε διαφορετικές τοποθεσίες και να εκτιμήσουν την συμμεταβολή της διαδικασίας προβλέψιμου σφάλματος.

Η μήτρα μέτρησης  $H$  - ή αλλιώς η μη γραμμική συνάρτηση  $h(*)$  - έχει ληφθεί από τις εκπεμπόμενες συναρτήσεις που αντλήθηκαν από την χρησιμοποίηση των κανόνων της ανταλλαγής ακτινοβολίας.

### 6.3 Περιοδικά επαναλαμβανόμενο πεδίο εκτίμησης και Kalman Filter εξισώσεις

Συμπεριλαμβάνει το μοντέλο των εξισώσεων 6-30 και 6-31 με καθορισμένα τα  $\theta$  και  $p(x(0))$ . Η χρησιμοποίηση των περιοδικά επαναλαμβανόμενων εξισώσεων έγκειται στην αναπαραγωγή εξαρτημένων πυκνοτήτων όπως οι ακόλουθες ξεκινώντας από το  $p(x(0))$

$$p(x(t) Y_t), p(x(t+1) Y_t), p(x(t+1) Y_{t+1}) \quad (6-40)$$

Όπου το  $Y_t = \{y(t), y(t-1), \dots, y(1)\}$  υποδηλώνει την ομάδα όλων των παρατηρήσεων οι οποίες είναι διαθέσιμες στον χρόνο  $t$ .

Ένα παραπάνω βήμα στην πρόγνωση έγινε χρησιμοποιώντας την εξίσωση πεδίου όπως παρακάτω:

$$p(x(t+1) Y_t) = \frac{\int p(x(t+1), x(t) | Y_t) dx(t)}{\int p(x(t+1) | x(t), Y_t) p(x(t) | Y_t) dx(t)} \int p_w(t) (x(t+1) - \hat{x}(x(t), u(t), \theta, t)) p(x(t) | Y_t) dx(t) \quad (6-41)$$

Όπου το  $P_{w(t)}(.)$  υποδηλώνει την πιθανότητα διανομής του  $w(t)$  και η ενοποίηση carried over το πεδίο του δείγματος  $x(t)$ .

Η σύγχρονη μέτρηση έγινε με την χρησιμοποίηση του κανόνα του Bayes και έγινε ως εξής

$$\begin{aligned} p(x(t+1) Y_{t+1}) &= p(x(t+1) | Y_t, y(t+1)) \\ &= p(y(t+1) | x(t+1)) p(x(t+1) | Y_t) \\ &= \int p(v(t+1) | x(t+1)) p(x(t+1) | Y_t) dx(t+1) \end{aligned} \quad (6-42)$$

Εδώ πρέπει να σημειωθεί ότι

$$p(y(t+1) | x(t+1)) = p_{v(t+1)}(y(t+1) - h(x(t+1), u(t+1), \theta, (t+1))) \quad (6-43)$$

Όπου το  $p_{v(t+1)}$  υποδηλώνει την πιθανότητα διανομής του  $v(t+1)$ .

Η εξίσωση 6-41 μπορεί να χρησιμοποιηθεί διεξοδικά και κατ'επανάληψη για την πρόγνωση σε ένα επίπεδο μεγαλύτερο της πρώτης προσέγγισης, και τα πραγματικά προγνωστικά μπορούν να δημιουργηθούν με ελαχιστοποίηση της συνάρτησης απωλειών, κανονικοποιημένη με σεβασμό στις προεπιλεγμένες πυκνότητες. Για παράδειγμα αν η συνάρτηση απωλειών είναι το μέσο τετράγωνο του λάθους της πρόγνωσης της πρώτης προσέγγισης, τότε το μέσο του  $p(x(t+1) | Y_t)$  έχει επιλεγθεί ως το καλύτερο προγνωστικό.

Άλλες ιδιότητες μιας συνάρτησης πυκνότητας που χρησιμοποιήθηκαν στην πράξη ευρέως, είναι ο διάμεσος, ο μέσος, η τυπική ελαχιστοποίηση του

απόλυτου λάθους πρόγνωσης και η τελευταία συλλογή της πιο πιθανής εκτίμησης της τυχαίας μεταβλητής.

Ο υπολογισμός των εξισώσεων (6-41) και (6-42) είναι δύσκολος και αυτό οφείλεται στην πολυδιάσταση των ενοποιήσεων καθώς και στην μη παραμετρική εξειδίκευση των συναρτήσεων πυκνότητας.

Η εξειδίκευση των αποτελεσμάτων στο γραμμικό μοντέλο των Gauss - Markov των εξισώσεων (6-32) και (6-33) δημιουργεί απλά αποτελέσματα και αυτό οφείλεται στα παρακάτω :

α) Οι γραμμικές μετατροπές των Gauss τυχαίων μεταβλητών είναι επίσης Gauss μετατροπές.

β) Η ομάδα του Gauss έχει την συζυγή ιδιότητα ότι για Gauss προτεραιότητες και Gauss συναρτήσεις πιθανοτήτων οι μεταγενέστερες κατανομές είναι επίσης κατανομές Gauss.

γ) Οι κατανομές του Gauss είναι εντελώς εξειδικευμένες από τις πρώτες δυο χρονικές στιγμές τους, μέσος και συμμεταβολή.

Μια δικαίωση για την χρησιμοποίηση της υπόθεσης του Gauss έρχεται από το Θεώρημα του Κεντρικού Ορίου (Central Limit Theorem) σύμφωνα με το οποίο τα οριακά αθροίσματα των ανεξάρτητων τυχαίων μεταβλητών κάτω από κανονικές συνθήκες έχουν κατανομές Gauss .

### 6.3.1 Kalman Filter εξισώσεις

Αν ληφθεί υπόψη ότι ο μέσος και η συμμεταβολή της συνάρτησης πυκνότητας του  $p(x(t+1)|Y_t)$ , μπορούν να προσδιορισθούν από τα  $x(t+1|t)$  και  $p(t+1|t)$  αντίστοιχα, τότε μπορεί επίσης να προσδιορισθεί το ίδιο

$$p(x(t+1)|Y_t) \sim N(\hat{x}(t+1|t), p(t+1|t))$$

Όπου το  $N(a,b)$  υποδηλώνει "κατανεμημένες συχνότητες με μέσο  $a$  και συμμεταβολή  $b$ ".

Παρομοίως

$$p(x(t+1)|Y_t) \sim N(x(t|t), p(t|t))$$

Η εξίσωση (6-41) οδηγεί στις δυο ακόλουθες εξισώσεις

Εξισώσεις πρόγνωσης

$$\hat{x}(t+1|t) = \Phi(t)\hat{x}(t|t) + G(t)u(t) \quad (6-44)$$

$$p(t+1|t) = \Phi(t)p(t|t)\Phi^T(t) + r(t)Q(t)\Gamma^T(t) \quad (6-45)$$

Η εξίσωση (6-42) οδηγεί στις ακόλουθες εξισώσεις

Τωρινές εξισώσεις

$$\hat{x}(t+1|t+1) = x(t+1|t) + K(t+1)v(t+1) \quad (6-46)$$

$$v(t+1) = y(t+1) - H(t+1)x(t+1|t) \quad (6-47)$$

$$K(t+1) = p(t+1|t)H^T(t+1)\Sigma^{-1}(t+1) \quad (6-48)$$

$$\Sigma(t+1) = H(t+1)P(t+1|t)H^T(t+1) + R(t+1) \quad (6-49)$$

$$P(t+1 \ t+1) = (I - K(t+1)) P(t+1 \ t) H^T(t+1) + R(t+1 \ t) \quad (6-50)$$

Αρχικές εξισώσεις

$$\hat{X}(0 \ 0)X_0 \quad (6-51)$$

$$P(0 \ 0)P_0 \quad (6-52)$$

Οι εξισώσεις (6-44) μέχρι και (6-50) αντιπροσωπεύουν τις βασικές εξισώσεις των Kalman Filter και επιλύθηκαν διεξοδικά αρχίζοντας από τις αρχικές συνθήκες με τις εξισώσεις (6-51) και (6-52) και έπειτα διαδοχικά με τις εξισώσεις (6-46) ως (6-50).

Για προγνώσεις πέρα από την πρώτη προσέγγιση στο μέλλον μόνο οι εξισώσεις (6-44) και (6-45) χρησιμοποιήθηκαν διεξοδικά.

## 6.4 Ένα μοντέλο για την πρόγνωση της πλημμύρας

Τα περισσότερα από τα μοντέλα υδρολογικής αντίδρασης, τα οποία έχουν τυποποιηθεί για διαδικασίες βροχής – απορροής, είναι κυρίως γραμμικά και προσδιοριστικά, με μεταβλητές στον χρόνο παραμέτρους. Τα μοντέλα αυτά όμως είναι ανεπαρκή για την ροή επιχειρήσεων πρόγνωσης καθώς και σκοπούς προγραμματισμού διότι δεν περιλαμβάνουν τις αβεβαιότητες οι οποίες είναι σύμφυτες με τον τύπο του μοντέλου και την εκτίμηση των παραμέτρων του. Στην πραγματικότητα η διαδικασία βροχής – απορροής είναι μη γραμμική και αστάθμητη και το πρόβλημα της πρόγνωσης συμβαδίζει με την διαδικασία και τις μετρήσεις προβλέψιμου σφάλματος.

Οι τελευταίες εξελίξεις στην μοντελοποίηση της υδρολογικής διαδικασίας περιλαμβάνουν όρους και τεχνικές πρόγνωσης από την μοντέρνα θεωρία του έλεγχου. Αυτές οι μέθοδοι επιχείρησαν να συμπεριλάβουν μια σαφή μελέτη της στοχαστικής φύσης της διαδικασίας αντίδρασης στην λύση του προβλήματος της πρόγνωσης.

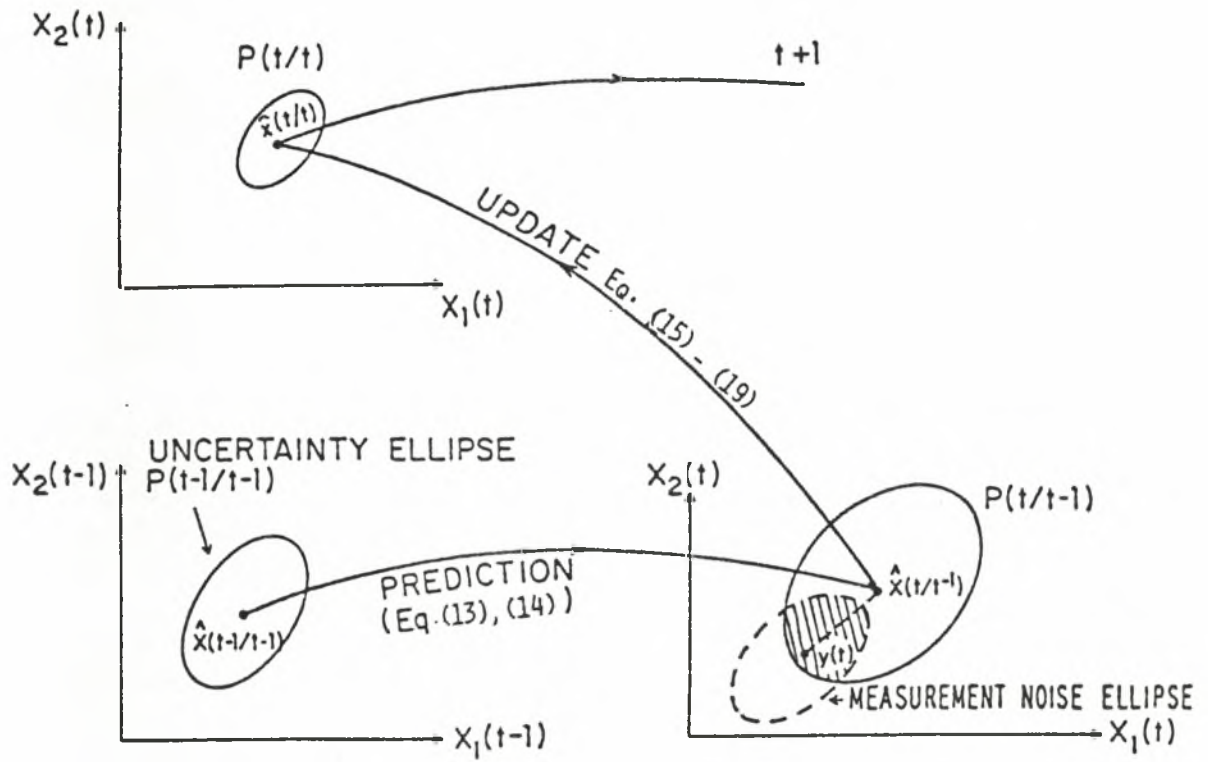
Οι Duong και Szollosi-Nagy επέκτειναν τις εφαρμογές της θεωρίας έλεγχου στην υδρολογία έτσι ώστε να συμπεριλαμβάνει προσαρμοσμένες εκτιμήσεις των noise επιπέδων εισαγόμενων δεδομένων. Σε αυτή την ενότητα εξετάζεται το πρόβλημα της πρόγνωσης ενός μη γραμμικού storage μοντέλου υδρολογικής αντίδρασης με παραμέτρους μεταβλητού χρόνου. Η εκτίμηση των σταδίων του συστήματος παρουσιάζεται κάτω από την υπόθεση ότι τα σταδία αυτά καθοδηγήθηκαν από το μηδενικού μέσου, προβλέψιμο σφάλμα του Gauss.

### 6.4.1 Μοντέλο μη γραμμικής αντίδρασης

Η σχέση παροχής και αποθήκευσης για την διαδικασία στην επιφάνεια της λεκάνης απορροής μπορεί να παρουσιασθεί με μια γενική, μη γραμμική, μεταβλητή στο χρόνο, εξίσωση

$$S(q,u,t) = a_1(t)q^N + a_2(t)\dot{q} + b_1(t)u + b_2(t)\dot{u} \quad (6-53)$$





**Σχήμα 6.7** Διάκριση του χρόνου σε δυο διαστάσεις στα Kalman Filter

Όπου τα  $S(q,u,t)$ ,  $q$ , και  $u$  υποδηλώνουν storage συνάρτηση, απ'ευθείας απορροής εξαγόμενα και περίσσεια εισαγομένων λεκάνης, αντίστοιχα. Τα  $a_1(t)$ ,  $a_2(t)$ ,  $b_1(t)$  και  $b_2(t)$  είναι παράμετροι μεταβλητού χρόνου. Το  $N$  είναι επεξηγηματικός όρος για την μη γραμμικότητα του συστήματος

Εισαγωγή στην υδρολογική ασυνεχή εξίσωση

$$\dot{S}(q,u,t) = u - q \quad (6-54)$$

Η προηγούμενες εξισώσεις οδηγούν σε μια νέα, δεύτερου τύπου, διαφορική εξίσωση

$$\ddot{q} + a_1(t)\dot{q} + a_2(t)q = \beta_0(t)\ddot{u} + \beta_1(t)\dot{u} + \beta_2(t)u \quad (6-55)$$

Όπου τα  $a_1(t)$ ,  $a_2(t)$ ,  $\beta_0(t)$ ,  $\beta_1(t)$  και  $\beta_2(t)u$  είναι συντελεστές μεταβλητού χρόνου οι οποίοι εξαρτώνται από τις πέντε παραμέτρους της εξίσωσης 6-53. Επίσης

$$a_1(t) = (Na_1(t)q^{N-1}) / a_2(t) \quad (6-56)$$

$$a_2(t) = 1 / a_2(t) \quad (6-57)$$

$$\beta_0(t) = -b_2(t) / a_2(t) \quad (6-58)$$

$$\beta_1(t) = -b_1(t) / a_2(t) \quad (6-59)$$

$$\beta_2(t) = 1 / a_2(t) \quad (6-60)$$

Το σύστημα δεν είναι γραμμικό στους παραγόμενους όρους που περιλαμβάνουν τον συντελεστή  $a_1(t)$ . Στην μεταγενέστερη ανάλυση η παράμετρος  $b_2$  στην εξίσωση 6-53 καθώς και ο συντελεστής  $\beta_0$  στην εξίσωση 6-58 υπολογίσθηκαν μηδέν. Έτσι από την εξίσωση 6-53 φαίνεται ότι το σύστημα δεν επηρεάστηκε από ένα αντίστοιχο προσδιοριστικό όρο κάτω από τον οποίο περιλαμβάνονται απ'ευθείας τα εισαγόμενα.

Η προσέγγιση αυτή έγινε καθαρά και μόνο για λόγους απλοποίησης. Ο συνυπολογισμός του όρου στην διάφορα της πρώτης προσέγγισης των εισαγομένων δεν πρόσθεσαν σημαντικά στα αποτελέσματα που αντλήθηκαν από την παρούσα εργασία. Από την άλλη πλευρά το αποτέλεσμα του επηρεασμού του συστήματος από τυχαίους όρους προβλέψιμου σφάλματος θα παρουσιασθεί παρακάτω.

#### 6.4.2 Προσδιοριστική εκτίμηση χρονικού βήματος χρονομεταβλητών παραμέτρων

Στο πρόβλημα της προσδιοριστικής εκτίμησης, οι παράμετροι του μοντέλου  $\pi = (\pi_1=a_1, \pi_2=a_2, \pi_3=b_1, \pi_4=N, )$  έχουν εκσυγχρονισθεί και προσαρμοσθεί σε κάθε μεγάλο χρονικό διάστημα το οποίο ονομάζεται χρονικός ορίζοντας και περιέχει μεγάλο αριθμό μικρών χρονικών προσαυξήσεων που ονομάζονται χρονικές περίοδοι. Ο εκσυγχρονισμός της διαδικασίας βασίσθηκε στην ελαχιστοποίηση του συνόλου του τετράγωνου του σφάλματος μεταξύ των υπολογιζόμενων και των παρατηρούμενων τιμών.

Ελαχιστοποίηση J

$$J = \sum_{t=1}^M e_t^2(\pi) = \sum_{t=1}^M \left( \hat{e}_t^2(\pi) + \sum_{i=1}^4 \frac{\partial \hat{e}_t(\pi)}{\partial \pi_i} \Delta \pi_i \right)^2$$

$$\hat{e}_t(\pi) = q_t - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^4 \hat{q}_t(\pi_i)$$

Εδώ το  $q_t$  είναι η τιμή που παρατηρήθηκε σε κάθε χρονικό ορίζοντα και  $q_t(\pi_i)$  είναι η τιμή που εκτιμήθηκε σε κάθε χρονική περίοδο συνυπολογίζοντας την αρχική τιμή  $\pi$  για τις παραμέτρους. Έπειτα το  $\Delta \pi_i$  είναι η απόδειξη που ζητήθηκε σε αυτές τις τιμές των παραμέτρων με στόχο να ελαχιστοποιήσει την αντικειμενική συνάρτηση. Σημειώνεται εδώ ότι το σύστημα του μοντέλου περιέχει τέσσερις παραμέτρους.

Ο υπολογισμός του τετράγωνου σφάλματος μεταφέρθηκε πάνω από τους  $M$  χρονικούς ορίζοντες που ο καθένας χωρίζεται σε  $n$  χρονικές περιόδους. Έτσι οι υπολογισμένες τιμές των παραμέτρων κρατούνται σταθερές πάνω από τις  $n$  χρονικές περιόδους σε κάθε χρονικό ορίζοντα.

Οι εκτιμήσεις που αντλήθηκαν από την λύση του μοντέλου της εξίσωσης (6-53) χρησιμοποιούν μια ορισμένη διαφορική προσέγγιση. Τα εισαγόμενα τα οποία χρησιμοποιήθηκαν είναι η περίσσεια βροχόπτωσης, η οποία μετρήθηκε φυσικά και οι ανάλογες / κατάλληλες αρχικές τιμές (σε αυτή την περίπτωση ίσες με μηδέν).

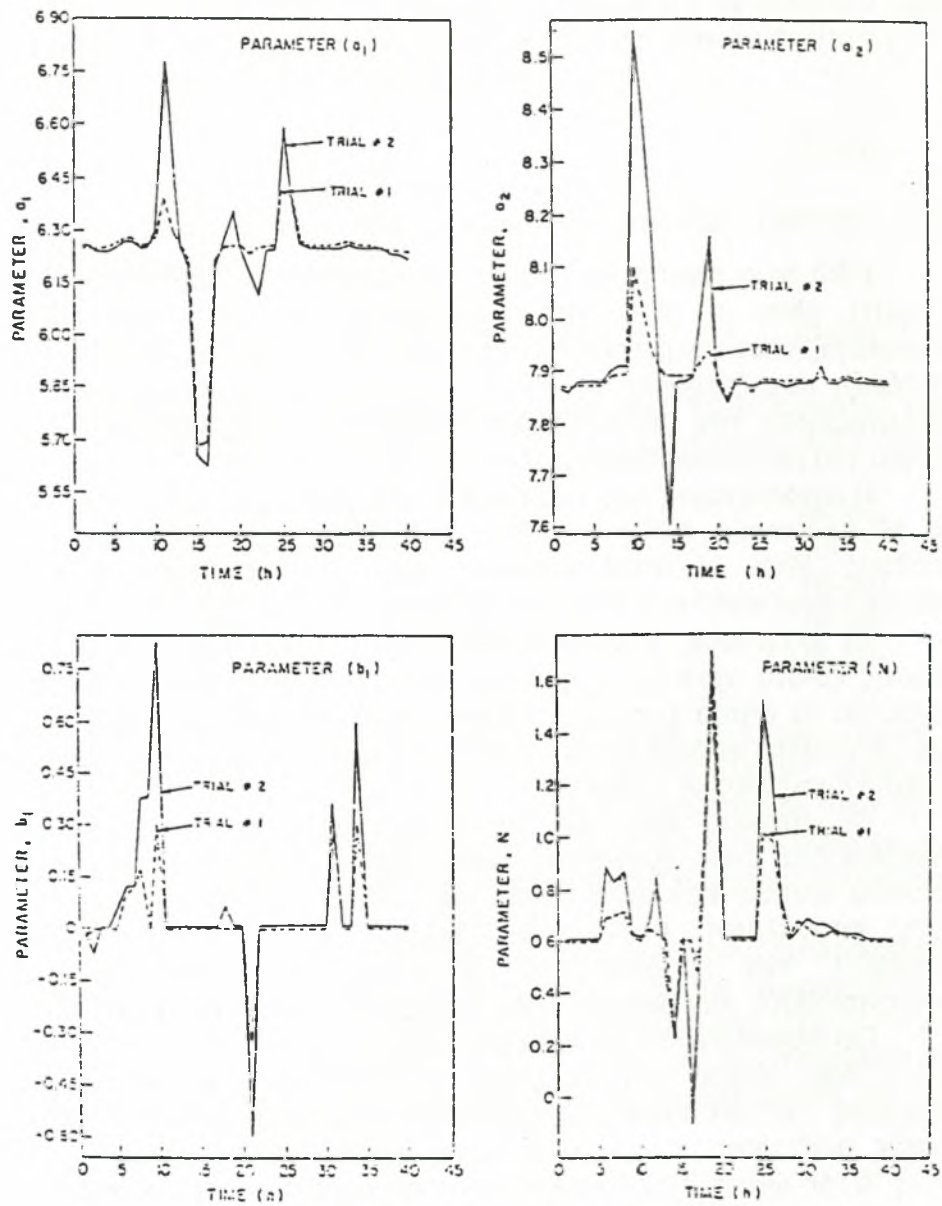
Οι αρχικές τιμές για τις παραμέτρους έχουν ληφθεί από τον συνυπολογισμό ενός συστήματος μεταβλητού χρόνου και της χρήσης ενός πρότυπου ερευνητικού αλγορίθμου για optimization. Από αυτές τις τιμές η πρώτη επανάληψη παρουσίασε βελτιωμένοι χρονική μεταβολή των εκτιμήσεων των παραμέτρων οι οποίες αργότερα μπορούν να χρησιμοποιηθούν σαν αρχικές τιμές για μια δεύτερη επανάληψη.

Για παράδειγμα από εμπειρία είναι γνωστό ότι δυο επαναλήψεις είναι αρκετές όσο αφορά την εκτίμηση ή πρόγνωση της υδρογραφίας της πλημμύρας. Για μια τυπική υδρογραφική πλημμύρα διάρκειας 48 ωρών, ο χρονικός ορίζοντας μήκους μιας ώρας χωρίσθηκε σε χρονικές περιόδους μήκους  $\frac{1}{4}$  της ώρας. Το όλο σύστημα αναπροσδιορίσθηκε με την μέθοδο της δόκιμης και της πλάνης. Σε κάθε περίπτωση αυτές είναι οι τιμές που χρησιμοποιήθηκαν για παραπέρα ανάλυση.

Η ελαχιστοποίηση της αντικειμενικής συνάρτησης οδηγεί σε ένα σύστημα το οποίο αποτελείται από γραμμικές εξισώσεις για τις τιμές του  $\Delta \pi$  οι οποίες απ'ευθείας λύθηκαν γι'αυτές τις ποσότητες. Οι εκτιμήσεις δηλαδή λαμβάνονται από τον τύπο

$$\pi = \pi + \Delta \pi \quad (6-61)$$

Στο σχήμα 6.8 φαίνονται οι τιμές των παραμέτρων οι οποίες προήλθαν από δυο επαναλήψεις.



**Σχήμα 6.8** Εκτιμήσεις των παραμέτρων μοντέλου μεταβλητού χρόνου για ένα μη γραμμικό υδρολογικό μοντέλο.



### 6.4.3 Kalman Filter εκτίμηση

Με τον προσδιορισμό :

$$\mathbf{x}^T(t) = [x_1(t), x_2(t), x_3(t), x_4(t)] \quad (6-62)$$

όπου τα συστατικά του ανύσματος  $X$  δίνονται από :

$$\begin{aligned} x_1(t) &= q(t) \\ x_2(t) &= \dot{q}(t) \\ x_3(t) &= a_1 N q^{N-1} \\ x_4(t) &= 1/a_2 \end{aligned}$$

όποτε η εξίσωση (6-53) του μοντέλου μπορεί να επαναδιατυπωθεί ως εξής :

$$d\mathbf{x} / dt = \mathbf{F} \{ \mathbf{x}(t), u(t), t \} \quad (6-63)$$

με :

$$\mathbf{F} \{ \mathbf{x}(t), u(t), t \} = \begin{bmatrix} x_2(t) \\ -x_4(t) x_2(t) x_3(t) - x_4(t) (x_1(t) - u(t) - b_1 u(t)) \\ (N-1) x_1^{-1}(t) x_2(t) x_3(t) \\ 0 \end{bmatrix}$$

Στην Kalman Filter εκτίμηση οι τιμές για τις παραμέτρους έχουν υπολογισθεί σαν step wise varying και δόθηκαν από την προσδιοριστική ανάλυση. Μόνον τέσσερις όροι του συστήματος έχουν εξετασθεί. Το πεδίο  $x_3$  του συστήματος συμπεριφέρεται σαν ένας συνδυασμός των παραμέτρων  $a_1$  και  $N$ . επίσης ένα σαφές συστημικό πεδίο στα όρια της παραμέτρου  $b_1$  δεν συμπεριλαμβάνεται. Επίσης τυχαία αναταραχή σε αυτήν την παράμετρο δεν θα εξετασθεί.

Οι μελέτες αυτές έχουν γίνει με μοναδικό σκοπό την όσο το δυνατόν μεγαλύτερη απλοποίηση και μόνο αυτήν. Σε διαφορετική περίπτωση θα μπορούσαν να υπάρχουν έξι συστημικά πεδία και η ανάλυση θα γινόταν πολύ πιο πολύπλοκη. Η προηγούμενη ανάλυση ευαισθησίας στο προσδιοριστικό μοντέλο έδειξε ότι η παράμετρος  $b_1$  έχει την μικρότερη επίδραση στην ροή που εκτιμήθηκε.

Η Kalman Filter ανάλυση προσδιορίζει την επίδραση τυχαία καθοδηγούμενων δυνάμεων στην εξέλιξη των πεδίων του συστήματος καθώς και τις ονομαστικές τιμές γι'αυτά τα πεδία, οι οποίες ελήφθησαν από την προσδιοριστική ανάλυση.

Εδώ πρέπει να σημειωθεί ότι η ένδειξη  $\Delta x(t)$  για το πεδίο του συστήματος έχει παρθεί από την λύση της ακόλουθης εξίσωσης από τις σειρές προσέγγισης του Taylor,

$$d \Delta x(t) / dt = \mathbf{F}'(t) \Delta x(t) \quad (6-64)$$

$$\text{όπου } F'(t) = -\frac{\partial F(t)}{\partial X(t)}$$

$$= \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ -x_4 & -x_4 x_3 & -x_4 x_2 & -(x_1 - u - b_1 u) \\ -(N-1)x_1^{-2} x_2 x_3 & (N-1)x_1^{-1} x_3 & (N-1)x_1^{-1} x_2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Αυτή είναι μια χρονομεταβλητή γραμμική διαφορική εξίσωση στο  $\Delta x(t)$ . Έχει πλέον υπολογισθεί ότι το σύστημα του μοντέλου στο  $\Delta x(t)$  έχει οδηγηθεί από ανάλογους τυχαίους όρους του προβλέψιμου σφάλματος. Επίσης το σύστημα της εξίσωσης 6-64 γίνεται :

$$d \Delta x(t) / dt = F'(t) \Delta x(t) + G(t) W(t) \quad (6-65)$$

Όπου το  $W(t)$  είναι το  $N(0, Q(t))$  και το  $G(t)$  είναι μια ταυτόσημη μήτρα.

Σε αυτήν την εξειδίκευση του  $G(t)$  το σύστημα οδηγήθηκε από όρους καθαρού οι οποίοι όπως συνήθως υπολογίσθηκαν από σχετική παρόμοια βιβλιογραφία. Αν υπολογισθεί ένα ξεχωριστό σύστημα εξισώσεων για το  $G(t)$ , τότε η επίδραση του μη προβλέψιμου σφάλματος σαν μια τυχαία καθοδηγούμενη δύναμη μπορεί να υπολογισθεί.

Εξειδικεύοντας μια παρατήρηση στο σύστημα, στην μορφή  $Z(t) = H(Z(t), t)$  όπου  $H^T(Z(t), t) = (Z_1(t), 0, 0, 0)$  και  $Z_1(t) = X_1(t) = q(t)$ , ένα μοντέλο παρατήρησης μπορεί να δημιουργηθεί με τον συνυπολογισμό της επίδρασης του τυχαίου noise, σαν αυτό που ακολουθεί :

$$\Delta Z(t) = H'(t) \Delta Z(t) + V(t) \quad (6-66)$$

$$\text{Όπου } H'(t) = [1, 0, 0, 0]$$

και το  $V(t)$  είναι  $N(0, R(t))$

Ξεκινώντας με αρχικές τιμές  $X(t_0) = 0$ , η καλύτερη εκτίμηση για αλλαγές στο  $\Delta x(t)$  έχει ληφθεί από την περιοδικά επαναλαμβανόμενη εξίσωση:

$$\Delta \Delta X(t) = F'(t) \Delta X(t) \Delta t + K(t) [\Delta Z(t) - H'(t) \Delta X(t) \Delta t] \quad (6-67)$$

Όπου το  $K(t)$  είναι το προστιθέμενο άνυσμα του Kalman που δόθηκε από την σχέση :

$$K(t) = P(t) H'^T(t) R^{-1}(t) \quad (6-68)$$

Το  $P(t)$  είναι η εκτίμηση του λάθους της συμμεταβολής. Το <<καπέλο>> στην μεταβλητή υποδηλώνει ότι είναι μια εκτίμηση μιας συγκεκριμένης ποσότητας.

Παρομοίως η καλύτερη εκτίμηση για τις αλλαγές στην παρατήρηση, αντλήθηκε από την σχέση :

$$\Delta \hat{Z}(t) = Z(t) - H(X(t), t) \quad (6-69)$$

Τελικά η απαιτούμενη εκτίμηση του διανυσματικού πεδίου και του παρατηρούμενου διανύσματος έχουν ληφθεί από τις σχέσεις :

$$\hat{X}(t) = X(t) + \Delta \hat{X}(t) \quad (6-70)$$

$$\hat{Z}(t) = Z(t) + \Delta Z(t) \quad (6-71)$$

Με στόχο να εγγυηθεί την εφαρμογή ενός σταθερού φίλτρου, το προστιθέμενο σταθερό πεδίο του Kalman και το σφάλμα της συμμεταβολής, το οποίο έχει εκτιμηθεί, είναι επαναλαμβανόμενα εκσυγχρονισμένα σε κάθε μεγάλο χρονικό ορίζοντα  $t$ , με την επίλυση των εξισώσεων του Riccati (σχήμα 6.9) :

$$K(t) = F'(t) P(t) H'^T(t) [H'^T(t) P(t) H'^T(t) + R(t)]^{-1} \quad (6-72)$$

$$P(t) = F'(t) P(t) F'^T(t) - K(t) H'(t) P(t) F'^T(t) + G(t) Q(t) G^T(t) \quad (6-73)$$

Στην πρακτική εφαρμογή του Kalman Filter αλγόριθμου, οι πραγματικές τιμές του επιπέδου της διαδικασίας του προβλέψιμου σφάλματος  $Q(t)$  καθώς και το επίπεδο της μέτρησης του προβλέψιμου σφάλματος  $R(t)$ , δεν είναι γνωστά. Παρ'όλα αυτά από τις δοσμένες αρχικές αυθαίρετες εκτιμήσεις, αυτές οι τιμές μπορούν να είναι συγχρονισμένες διαδοχικά με προσαρμοσμένες εκτιμήσεις των αλγόριθμων. Το επίπεδο της μέτρησης προβλέψιμου σφάλματος  $R(t)$ , εκτιμήθηκε προσαρμοζόμενο με τις εκτιμώμενες μετρήσεις του σφάλματος, σύμφωνα με την ακόλουθη προσέγγιση :

$$R_K(t) = k-1 / k R_{K-1}(t) + 1/k [\Delta Z_K(t) - H'(t) P_{K-1}(t) H'^T(t)] \quad (6-74)$$

Όπου το στοιχείο  $K$  στον παρονομαστή υποδηλώνει τιμές για την  $K$ -οστή επανάληψη στον χρονικό ορίζοντα  $t$ . Παρομοίως το επίπεδο της διαδικασίας noise  $Q(t)$  έχει συγχρόνως προσαρμοσθεί με το εκτιμώμενο σφάλμα σε συμφωνία με την ακόλουθη προσέγγιση :

$$Q_K(t) = \Delta \hat{X}(t) \Delta \hat{X}^T(t) - H'(t) P_K(t) H'^T(t) + R_K(t) / H'(t) G(t) G^T(t) H'^T(t) \quad (6-75)$$

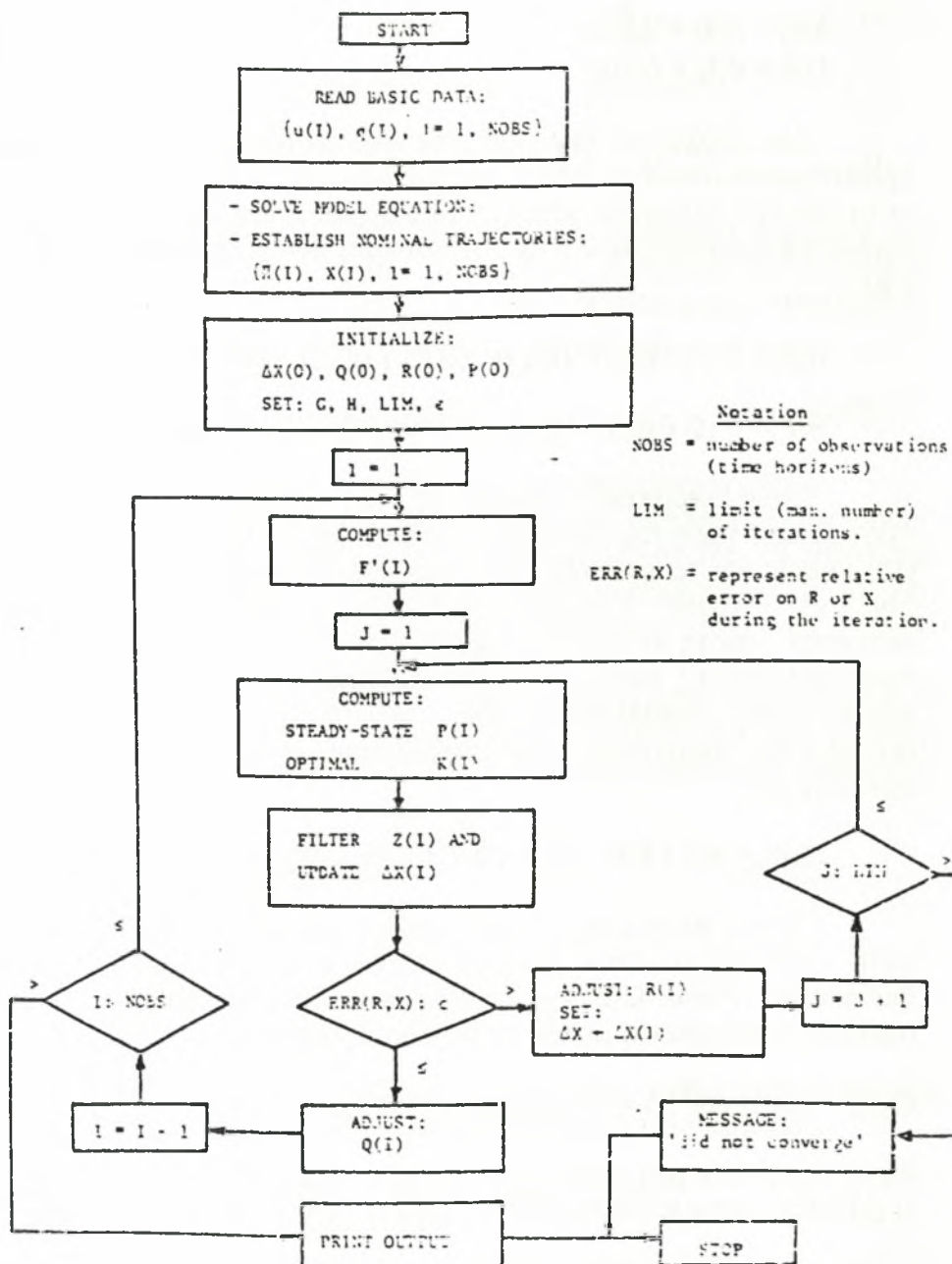
Αν το  $Q_K(t)$  είναι μικρότερο από το μηδέν τότε αυθαίρετα γίνεται ίσο με μηδέν. Η σύγκλιση στην  $K$ -οστή επανάληψη επιτυγχάνεται με την εξειδικεύσει των :

$$\frac{|\hat{R}_K(t) - \hat{R}_{K-1}(t)|}{\hat{R}_K(t)} \leq \epsilon$$

$$\frac{|\hat{X}_K(t) - \hat{X}_{K-1}(t)|}{\hat{X}_K(t)} \leq \epsilon$$

Όπου το  $\epsilon$  είναι προεξιδεικευμένο επίπεδο αντοχής.

Τα παραδείγματα των αποτελεσμάτων των εφαρμογών των Kalman Filter και οι προσαρμοζόμενοι αλγόριθμοι εκτιμήσεων φαίνονται στα σχήματα 6.10, 6.11 και 6.12.



Σχήμα 6.9 Σχηματικό διάγραμμα του αλγόριθμου εκτίμησης

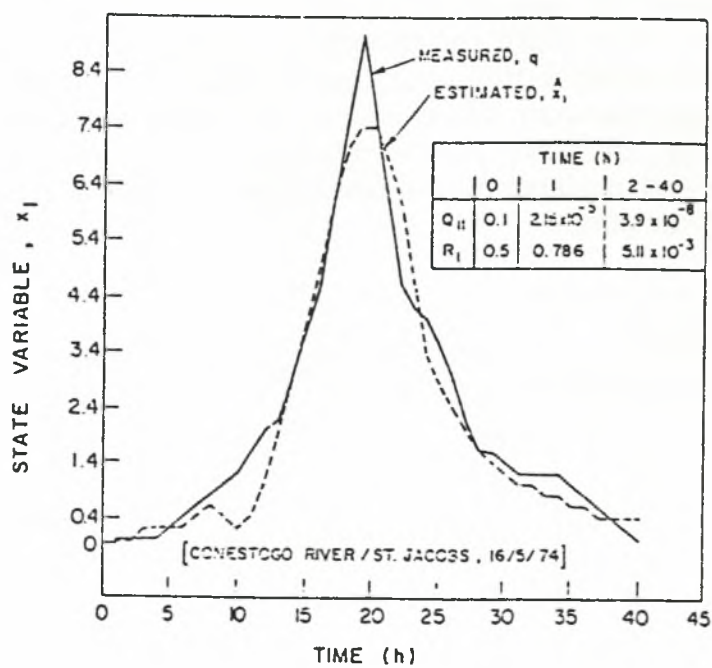


Τα εξαγόμενα της υδρογραφικής πλημμύρας και η σημασία της Kalman Filter εκτίμησης  $X_1(t)$  για ένα υδρολογικό συμβάν στον Καναδά δείχνει το σχήμα 6.10. Σε αυτό το σχήμα οι αρχικές τιμές είναι τόσο καλές όσο και οι προσαρμοζόμενες εκτιμώμενες τιμές για συγκεκριμένα στοιχεία της μήτρας μεταβολής  $Q$  και  $R$  σε συνεργασία με το συστημικό πεδίο  $X_1$ .

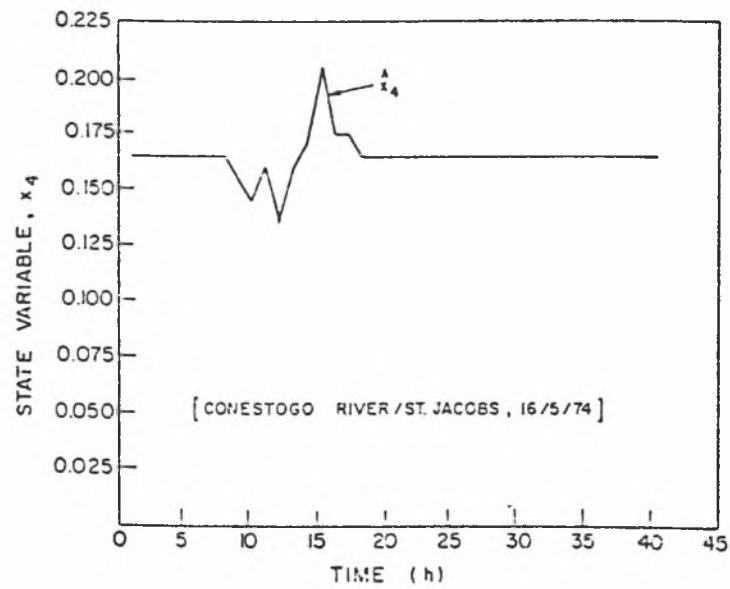
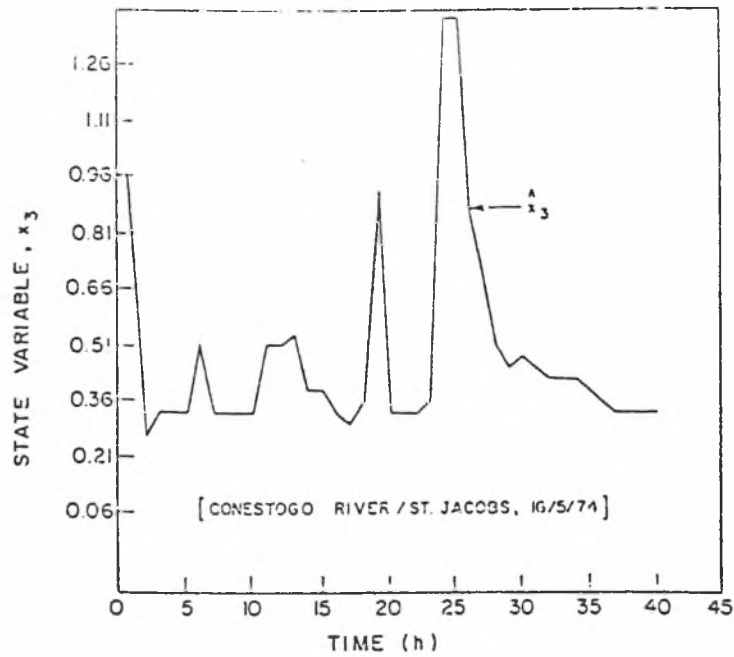
Βρέθηκε ότι μετά από λίγους χρονικούς ορίζοντες επιτυγχάνουν το σταθερό πεδίο τιμών τους. Οι σχετικά μικρές τιμές γι'αυτά τα εκτιμώμενα noise επίπεδα συμπεριλήφθηκαν στις τιμές οι οποίες αναμενότανε για αυτόν τον τύπο υδρολογικού γεγονότος.

Η εξέλιξη του συστημικού πεδίου  $x_3$  και  $x_4$  φαίνεται στο σχήμα 6.11.

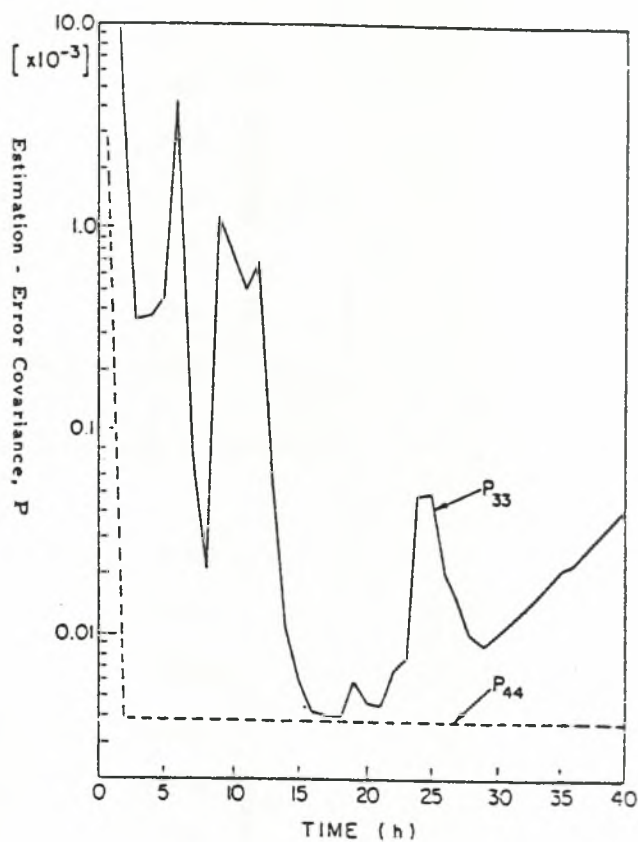
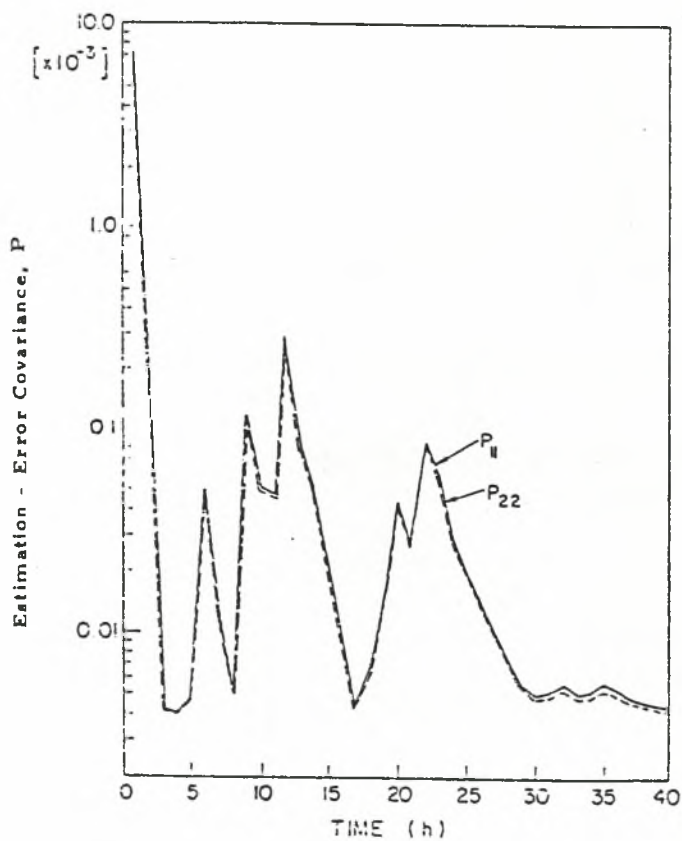
Το σχήμα 6.12 δείχνει την διασπορά των εκτιμήσεων για την εκτίμηση του σφάλματος της συμμεταβολής. Παρ'όλο που οι τιμές της Kalman Filter προσέγγισης και οι τιμές της εκτίμησης του σφάλματος της συμμεταβολής είναι σχετικά μικρές ο προσαρμοζόμενος αλγόριθμος εκτίμησης περικόπτει κάθε σοβαρή επίπτωση που οφείλεται σε απόκλιση των φίλτρων. Επίσης η εκτίμηση του επιπέδου του προβλέψιμου σφάλματος τείνει να εισάγει διορθώσεις για σφάλματα που οφείλονται στα μοντέλα που εκτιμούν την παραγωγή των φυτών.



**Σχήμα 6.10** Διάδοση των εκτιμήσεων του πεδίου μεταβλητών  $x_1$  σε μη γραμμικό μοντέλο με στοχαστική εκτίμηση



Σχήμα 6.11 Διάδοση του πεδίου μεταβλητών  $x_3$  και  $x_4$



Σχήμα 6.12 Εκτίμηση – σφάλμα συμμεταβολής,  $P$



## 6.8 Συμπεράσματα για την Kalman Filter εκτίμηση.

Το αυξημένο ενδιαφέρον για τις περιβαλλοντολογικές επιπτώσεις των ανθρώπινων δραστηριοτήτων έχει οδηγήσει στην ανάγκη για διαρκή καταγραφή, διαχείριση και πρόβλεψη, καταστάσεων όπως :

- πλημμύρες ή ξηρασίες
- όξινη βροχή
- υποβάθμιση του εδάφους
- διάχυση λιπασμάτων
- ρύπανση
- εχθροί καλλιεργειών
- πυρκαγιές
- απώλειες παραγωγής λόγω επιδημιών, ασθενειών κ.α.

Οι καταστάσεις αυτές απαιτούν την ανάπτυξη ειδικών μοντέλων πρόγνωσης σε πραγματικό χρόνο.

Η διαθεσιμότητα ψηφιακών χαρτών και δορυφορικών εικόνων έχουν επιτρέψει την δημιουργία μεγάλων τραπεζών δεδομένων. Επίσης η ανάπτυξη των ηλεκτρονικών υπολογιστών έκανε δυνατή την λύση πολύπλοκων διαφορικών εξισώσεων. Τα γεγονότα αυτά έχουν πλέον καταστήσει δυνατή και ενδιαφέρουσα την χρήση δυναμικών μοντέλων φυσικής βάσης τα οποία αναπαριστούν τις βιολογικές και χημικές εξισώσεις που υπεισέρχονται.

Θα μπορούσε κάποιος να υποστηρίξει ότι αυτό που ονομάζεται Kalman Filter μοντέλα είναι μια τεχνική πάνω στην οποία βασίζεται η δομή των μοντέλων πρόβλεψης σε πραγματικό χρόνο ( real time forecasting ). Γενικά τα μοντέλα αυτά στηρίζονται σε τεχνικές διαρκούς ενημέρωσης και ρύθμισης και αποτελούν μέρος ενός ολόκληρου συστήματος πρόβλεψης. Το σύστημα αυτό περιλαμβάνει αυτόματη ενσωμάτωση νέων δεδομένων, αξιολόγηση δεδομένων, τεχνικές πρόβλεψης και αξιοποίηση των προβλέψεων. Μερικά από τα μοντέλα που αναπτύχθηκαν διεθνώς εμφανίζονται στον πίνακα 6.4.

Στην ενότητα αυτή το πρόβλημα της παραμέτρου και του πεδίου εκτίμησης για μη γραμμικά μοντέλα βροχής απορροής παρουσιάστηκε σαν ένας συνδυασμός προσδιοριστικού και στοχαστικού προβλήματος πρόβλεψης. Το πρόβλημα της πρόγνωσης αρχικά λύθηκε προσδιοριστικά συνυπολογίζοντας την χρονική μεταβολή στις παραμέτρους. Αυτό αποτέλεσε την βάση για μια παραμετρική ανάλυση ευαισθησίας η οποία με την σειρά της παρουσίασε ποσοτικές μετρήσεις για ανάθεση σχετικών βαρών στον προσδιορισμό των step wise χρονομεταβλητών τιμών για τις παραμέτρους του μοντέλου.

Οι step wise χρονομεταβλητές παράμετροι χρησιμοποιήθηκαν σαν εισαγόμενα στο πρόβλημα της στοχαστικής πρόβλεψης. Η επαναλαμβανόμενη λύση της ασυνεχούς εξίσωσης του Riccati για την σταθερού πεδίου προσθήκη του Kalman και η εκτίμηση του σφάλματος συμμεταβολής σε κάθε χρονικό ορίζοντα, εξασφάλισαν αλγόριθμο σταθερής λύσης.

Ο αλγόριθμος πρόβλεψης και τα αποτελέσματα του, μπορούν να επεκταθούν σε πρόβλεψη σε πραγματικό χρόνο. Αυτό μπορεί να συμβεί με τον συνδυασμό των εφαρμογών ενός γραμμικού, προσδιοριστικού έλεγχου,

αλγόριθμου και περιοδικά επαναλαμβανόμενου στοχαστικού φίλτρου, με στατιστικά στοιχεία του προβλέψιμου σφάλματος του Gauss.

Πίνακας 6.4 Κατάλογος μοντέλων βροχής – απορροής

Όνομα	Χώρα	Τύπος	Αριθ. Παραμέτρων	Βιβλιογραφία
UBC	Καναδάς	Αδρομερές	35	Quick & Pipes (1977)
CEQUEAU	Καναδάς	Κατανεμημένο	33	Charbonneau, Morin και άλλοι (1977)
ERM	Τσεχοσλοβακία	Αδρομερές	9	Turcan (1981)
GAPI	Ουγγαρία	Αδρομερές	10	Pinter & Szabo (1985)
SMAR	Ιρλανδία	Αδρομερές	5	Maneville και άλλοι (1970)
CLS	Ιταλία	Αδρομερές	ποικίλος	Natale & Todini (1976)
HBV	Σουηδία	Αδρομερές	23	Bergstrom & Forsman (1973)
SRM	Ελβετία, ΗΠΑ	Αδρομερές	7	Martinec (1975)
HFS	ΗΠΑ		16	Georgakakos (1986)
SSARR	ΗΠΑ	Αδρομερές	12	U.S. Army Corps of Engineers (1975), Rocwood & Nelson (1966)
NAMSII	Δανία	Ημικατανεμημένο	13	Nielsen & Hansen (1973)
NAMKAL	Δανία	Αδρομερές	13	Nielsen & Hansen (1973)
SHE	Δανία, Γαλλία, Αγγλία	Κατανεμημένο	-	Abbott και άλλοι (1986)
ILWAS	ΗΠΑ	Ημικατανεμημένο	-	Chen et al (1982)

## 6.9 Βιβλιογραφία Κεφαλαίου 6

1. Abashina, EV 1979: A method to account for nitrogen nutrition of vegetation in dynamic models designed for a assessment of agrometeorological conditions for yield of cereal crops. Collect Works IEM (Institute of Experimental Meteorology) 13 (91):101-119
2. Abashina EV, Nemcnenko OA 1990: Simulation submodel for metabolism of phytohormones. Collect Works ARRIAM (All-Russian research Institute of Agricultural Meteorology) 26:53-58
3. Andropova TM, Dobretsov AN 1917: Prediction of spring wheat yield under the conditions of the Krasnoyarsky kray. Chem Agric. 11:61-66
4. Asaturov ML, 1969: An addition to the theory of the water-heat regime of vegetation cover. Collect Works Main Geophys Observ. 149:65-71
5. Baranovsky PM, Galyamin EP, Filimonov MS et al 1978: Issues of management of crop yield under irrigation. All-Russian Inst Irrigated Farming Volgograd, 128 pp.
6. Bikhel I, Moldau H, Ross Y 1980: A submodel of assimilation and growth of plants under water deficit. Tartu, Acad Sci Estonia A-5:21
7. Boiko AP, Sirotenko OD 1985: Modelling of energy and mass exchange of soil-plant-atmosphere system under deficit of soil moisture. Collect Works ARRIAM. Hydrometeoizdat, Leningrad 10:3-26
8. Boiko AP, Safarov SG, Sirotenko OD 1990: Modelling of daily variations in total evaporation from agricultural crops. Collect Works ARRIAM 26:22-33
9. Bondarenko NF, Zhukovsky EE, Mushkin IG 1982: Modelling productivity of agroecosystems. Hydrometeoizdat, Leningrad, 262 pp.
10. Budagovsky AI 1980: Evaporation of soil waters. In: Nerpin SV (ed) Physics of soil waters. Nauka, Moscow, pp 13-95
11. Budagovsky AI, Lozinskaya FA 1976a: A system of equations for heat and moisture exchange in vegetation cover. Water Resour 1:78-94
12. Budagovsky AI, Lozinskaya EA 1976b: Theory of total evaporation and its applications. Water Resour 2:34-55
13. Budagovsky AI, Nichiporovich AA, Ross YK 1964: Quantitative theory of photosynthesis and its use for solving scientific and applied problems of physical geography. Izv. USSR Acad Sci Ser Geor 6: 13-27.
14. Budyko MI 1964: An addition to the theory of the influence of climate factors on photosynthesis. Proc USSR Acad Sci 158 (2):331-334.
15. Budyko MI, Gandin LS 1964: About taking into account characteristics of physics of the atmosphere in agrometeorological research. Meteorol. Hydrol. 11:3-11 ,
16. Budyko MI, Gandin LS 1968: An addition to the theory of heat regime of vegetation cover. Collect Works Main Geophys Observ 229:69-73.
17. Chudnovsky AF 1948: Physics of heat-exchange in soil. Gostechizdat Moscow.
18. Chudnovsky AF 1976: Thermal physics of soils. Nauka, Moscow , 351 pp.
19. Chuvashina NB 1983: Development of the method to calculate dynamics of content of mineral factors of nitrogen in soil under agricultural crops in the basis of mathematical modelling. Author's abstract of dissertation for Candidate in agriculture, Agrophysical Res Inst Leningrad 19 pp.



20. Dalezios N. R. 1996: An overview of recent developments and applications in crop monitoring and yield assessment. International Symposium on Applied Agrometeorology and Agroclimatology. Volos 1996.
21. Δαλέζιος Ν. Ρ. 2000: Σημειώσεις Αγρομετεωρολογίας, πανεπιστημιακές παραδόσεις. Βόλος 2000.
22. Dandaron ZD 1974a: Approximate calculation of evaporation from soil with a dry layer. Meteorol Hydrol 2:166-172
23. Dandaron ZD 1974b: Effect of negative change in water evaporation from soil with a dry layer. Meteorol Hydrol 7:66-74
24. Daus YV 1991: Development of a mathematical model for water-heat regime and productivity of lucerne or the purposes of agrometeorological provision of agriculture. Author's abstract of dissertation for Candidate of Geographic Science, OHMI-Hydrometeorol Inst Odessa, 16 pp.
25. Denisov YM 1968: Transfer of moisture and heat in soil. Collect works SANIGMI 39 (54):3-19.
26. Denisov YM 1978: Mathematical model for moisture, heat and salt transfer in soils. Meteorol Hydrol 3:71-79.
27. Dercach LN 1978: Impact of meteorological conditions on the yield of new varieties of winter wheat. Collect Works USSR Hydrometeocenter 193:99-108.
28. De Witt CT, Brouwer R, Penning de Vries FWT 1971: A dynamic model of plant and crop growth. In: Wareing PP, Cooper JP (eds) Potential Crop Production. A case study. Heinemann Education Books, London, pp 117-142.
29. Directorenko VM 1989: Calculation methods for assessing agrometeorological conditions for Candidate and programming its yield in Moldavia. Author's abstract of dissertation for Candidate of Geographic Science, OHMI-Hydrometeorol Inst Odessa, 16 pp.
30. Dobrachev YP 1982: Structure of autoregulatory model for plant growth AURORA. Dynamic modelling in agrometeorology. Hydrometeoizdat, Leningrad 17-27 pp.
31. Dolgy Trach VA 1987: Application of model WEATHER-YIELD-3 to calculate winter wheat yield. Collect Works ARRIAM 21:54-66
32. Dooge J.C. 1959: A general Theory of Unit Hydrograph, Journal of Geophysical Research, Vol. 64 No 1, 241-256 pp.
33. Dubov AS, Bykova LP, Marunich SV 1987: Turbulence in vegetation cover. Hydrometeoizdat, Leningrad, 182 pp.
34. Dukov R 1987: Analysis of multi-year variations in sunflower production and the qualitative estimation of agrometeorological conditions of its yield with the help of a dynamical model. Author's Abstr, BAH, Sofia, 31 pp.
35. Duong N., Winn C., Johnson G. 1975: Modern Control of Concepts in Hydrology, IEEE Transaction of Systems, Man, and Cybernetics, Vol. SMC-5 No1, 46-53 pp.
36. Fedyushina DP 1980: A method for prediction of spring wheat yield for the western Kazakhstan. Collect Works KazNIGMI 70: 12-22.
37. Fedyushina DP, Zavyalova LA 1980: A method for prediction of spring wheat yield for the Turgaiskaya region. Collect Works KazNIGMI 70:23-27
38. Fisher RA 1925: The influence of rainfall on the yield of wheat at Rothamsted. Philos Trans R Soc Ser B 213:89-142.



39. Galyamin EP 1980: Optimisation of operational distribution of water resources in irrigation. Hydrometeoizdat, Leningrad, 217 pp.
40. Galyamin EP, Siptits OS, 1977: A dynamic model for the productive process of maize and its applications for optimisation of water regime. Collect Works IEM 8:114-123
41. Globus AM 1987: Soil – hydrophysical provision for agroecological mathematical models. Hydrometeoizdat, Leningrad, 427 pp.
42. Gulyaev VI 1983: Photosynthesis and production process. Naukova dumka, Kiev, 14 pp.
43. Gulyaev BI, Mitrofanov BA 1983: Photosynthesis and production process. Naukova dumka, Kiev, 144 pp.
44. Hino M. 1973: On line prediction of Hydrologic System, proceedings of the 15<sup>th</sup> congress of the International Association for Hydraulic Research, Vol. 4, 121-129 pp.
45. Hino M. 1975: Estimation of Discharge Characteristics in Rapidly Changing Hydrologic Basin, Symposium on the Hydrological Characteristics of River Basins, Tokyo, IAHS Public. No 117, 113-319 pp.
46. Jazwinski A 1970: Stochastic process and filtering theory, Academic Press, New York.
47. Ivanov LA 1996: Light and moisture in the life of our wood species. V Timiryazev reading. Izv USSR Acad Sci Moscow, 60 pp.
48. Kan NA 1981: System of simulation modelling of agrocenoses. In: Stolyarov AI (ed) High-intensity use of irrigated lands. Novochoerkassk South Institute of Hydrotechniques and heclamation, pp 149-154.
49. Kan NA 1989: Problem: in the methodology of simulation modelling of agrocenoses. Inst Soil Sci Photosynthi, Pushchino, 31 pp.
50. Kan NA 1992: Orginogenesis and morphological structure of cereal crops in mathematical models of agroecosystems. Hydrometeoizdat St Petersburg, 133 pp.
51. Kan NA, Chuprinin VG, Sorochan KI, 1984: Mathematical support for the system of simulation modelling of agrocenoses. Novochoerkassk South Institute of Hydrotechniques and heclamation, pp 67-80.
52. Kharchenko et aL 1910: Recommendations for calculating evaporation from natural lands and agricultural fields by the heat-water balance method. Hydrometeoizdat, Leningrad, 65 pp.
53. Kharhevskaya NF 1986: Calculation of tomato yields using á dynamic model "water -yield". Collect Works ARRIAM 21: 48-54.
54. Khitrovo EV, Kuperman IA, 1980: Influence of mineral nutrition on the relation between characteristics of respiration gas exchange of plants calculated on the basis of protein nitrogen and dry biomass. Physiol Biochem Cult Plants, 12 (3):269-279.
55. Kirilicheva KV, 1980: Assessment of the effect of temperature and precipitation on the yield of spring wheat. Collect Works USSR Hydrometeocentre 124: 39-46 pp.
56. Kozhushnyan EA, Uzyanova KV, 1966: On the issue of prediction of spring wheat yield. Collect Works Sverdlovskaya Hydrometeorol Serv 5:17-32.
57. Kresnyankaya VP, 1977: Dependence of spring wheat yield on agrometeorological conditions of the growing period in the Primorslky Kray. Collect Works DVNIGMI 59:9-11, pp.

58. Kuperman IA, 1972: About nitrogen and light uptake ratio control for higher terrestrial plants. Physiological mechanisms of adaptation and resistance of plants. Nauka, Norosibirsk, pp 5-34.
59. Kuperman IA, Khitrovo EV 1977: Respiration gas exchange as an element of the production process of plants. Nauka, Novosibirsk, 184 pp.
60. Kuperman IA, Khitrovo EV, Maslova IY, 1983: About investigation of causes of plant productivity reduction at nitrogen excess. *Physiol Biochem Cult Plants* 15 (N5): 419-426.
61. Kurtener DA, Cbudnovsky AF 1969: Calculation and control of thermal regime in open and protected ground. Hydrometeoizdat, Leningrad, 299 pp.
62. Laisk AH, 1977: Kinetics of photosynthesis and photorespiration  $C_3$  plants. Nauka, Moscow, 195 pp.
63. Lee S. 1972: Analysis, modeling and forecasting of water quality systems-non linear filtering and estimation Vol. II, Kansas Water Resources Research Institute, Contribution No 110.
64. Logan W.C., Lennox W.N., Unny T.E. 1979: A time varying non linear Hydrologic response model for flood hydrographic estimation in a noisy environment.
65. Maslovaskaya AD 1974: A method of long-term agrometeorological prediction of republican averaged yield of winter wheat in Kazakhstan. *Collect Works KazNIGMI* 47:117- 130, pp.
66. McCree KJ, 1971: An equation for the rate of respiration of white clover plants grown under controlled conditions. In: Setlic I (ed) *Production and measurment of photosynthetic productivity*. PUDOC, Wageningen, pp 221-229.
67. Menzhulin GV, 1970: An addition to the methodology of calculating meteorological regime of vegetation cover. *Meteorol Hydrol* 2:92-99.
68. Menzhulin GV, 1973: An addition to the theory of stationary meteorological regime in vegetation cover. *Collect Works Main Geophys Observ* 227:20-28.
69. Menzhulin GV, 1974: Modelling of meteorological regime of vegetation cover. *Collect Works Main Geophys Observ* 318:5-34.
70. Menzhulin GV, 1977: Modelling moisture exchange and transpiration in the soil-plant-atmosphere system. *Collect Works State Hydrol Inst* 247:36-44.
71. Mkrtchyan RS, Arustamyan SA, 1975: Methodological guidance on long-term agrometeorological prediction of winter wheat yield in the Armyanskaya SSR. *ZakNIGMI*, Erevan, 27 pp.
72. Mokronosov AT 1982: Donor-acceptor relations in plant ontogenesis. In: Nichiporovich AA (ed) *Physiology of photosynthesis*. Nauka, Moscow, pp 235-250.
73. Mokronosov AT, 1983: Photosynthesis function and integrity of a plant organism. *Timiryazev readings XLII USSR Acad Sci Moscow*, Nauka 63 pp.
74. Moldau AA, 1973: influence of water deficit on stomatal resistance (Mathematical model). *Izv Acad Sci Estonian SSR Ser Biol* 22 (N4):48-357.
75. Moldau AA, 1977: Stomata - universal regulators of photosynthesis. *Physiol Plant* 24 (5):969-975.

76. Moldau AA, 1984: Autoregulation of production process of plants at water deficit. *Inst Plant Physiol Moscow*, 44 pp.
77. Nalimov VV, 1983: Analysis of principles of environmental forecast. *Quest Philos* 1:108-117.
78. Novak V, 1980: Movement of water in the soil during evaporation. In: Nerpin SV (ed) *Physics of soil waters*. Nauka Moscow.
79. Obukhov VM 1949: Yield and meteorological factors. Gosplanizdat, Moscow, 316 pp.
80. Pavlova VN, Sirotenko OD, 1985: About use of dynamic models for assessing the effect of possible changes and climatic variations on yield of agricultural crops. *Collect Works ARRIAM* 10:81-90.
81. Pavlova VN, Morozova NS, Lavrov SA, 1986: An addition to the definition of moisture transfer parameters of frozen soils. *Proc State Hydrometeorol Inst* 308.
82. Parry M, 1990: Climate change and world agriculture. Earthscan. London, 157 pp.
83. Polevoy AN, 1983: Theory and calculation of crop productivity. *Hydrometeoizdat Leningrad*, 175 pp.
84. Polevoy AN, Myzina TI, 1976: Methodological guidance on compiling an agrometeorological forecast of region-averaged yield of spring barley in the Nechernozemnyy zone of the European part of USSR. *Hydrometeoizdat Moscow*, 39 pp.
85. Poluektov RA, 1991: Agroecosystem dynamics simulation. *Hydrometeoizdat Leningrad*, 312 pp.
86. Poluektov RA, et al. 1984: A basic simulation model of wheat productivity. *Wiss Z Humbolt-Univ Berl Math Naturwiss Reihe XXXIII*:339-342 pp.
87. Ponomarev BP, 1974: Methodological guidance on compiling agrometeorological forecasts of region-averaged yield of spring wheat in the steppe and forest-steppe zones of western Siberia. *Hydrometeoizdat Moscow*, 174, 11 pp.
88. Ross YK, 1966: An addition to the mathematical description of plant growth. *Rep USSR Acad Sci* 171 (N2):481-483 pp.
89. Ross YK, 1967: A system of equations for quantitative growth of plants. In: Ross YK (ed) *Phytoactinometric studies of vegetation cover*. Tallinn. Valgus, pp 64-88.
90. Ross YK, 1975: Radiation regime and architectonics of vegetation cover. *Hydrometeoizdat Leningrad*, 342 pp.
91. Ross YK, Bikhele ZN, 1968: Calculation of photosynthesis of vegetation cover. In: Ross YK, *Photosynthesis and productivity of vegetation cover*. *Inst Phys Astron Estonian Acad Sci, Tartu*, pp 75-110.
92. Satyr ZA, 1973 : Two-factor optimisation model weather-yield. *Collect Works IEM* 3(40): 109-114 pp.
93. Savvateev SP, 1979: About a numerical model of water exchange in the system soil-plant-surface atmospheric layer. *Collect Works State Hydrol Inst*, 257:96-101.
94. Semikhatova OA 1980: Energy aspects of physiological processes in plants. *Physiol Plant* 27 (5):1005-1017.
95. Semikhatova OA, Ivanova TI, Golovko TK, 1979: Respiration for sustaining cell structure in arctic plants. *Physiol Plant* 26 (5):1093-1102.



96. Sepp YV, Tooming HG, 1982: Production process and actually possible yield of potato (dynamic model). *Agric Biol* 17 (1):89-97.
97. Shchenina DN, 1978: An addition to the methodology of prediction of district-averaged yield of spring wheat in the Kulundinsky zone of the south-east western Siberia. *Collect Works West-Siberian Hydrometeorol Res Inst* 32:3-11.
98. Shlyachkova AA, 1990: Problem of optimisation of regime of agroecosystems phytomass collection. *Collect Works ARRIAM* 26:97-103.
99. Sirotenko OD, 1969: Multidimensional regression analysis as a method of studying the relationship of yield of agricultural crops and hydrometeorological factors. *Meteorol Hydrol* 12:68-87 pp.
100. Sirotenko OD, 1971: Component analysis in prognostic tasks of agrometeorology. Methodological guidelines. Hydrometeoizdat Moscow, 53 pp.
101. Sirotenko OD, 1981: Mathematical modelling of the thermal and moisture regime and productivity of agroecosystem. Hydrometeoizdat Leningrad, 167 pp.
102. Sirotenko OD, 1984: Methods to generalise the photosynthesis theory of productivity of agroecosystems. *Rep VASHNIL* 10:5-8.
103. Sirotenko OD, Abashina EV, 1985a: Mathematical model for growth and development of plants at the level of phytomers. *Physiol Biochem Cult Plant* 2:166-174.
104. Sirotenko OD, Abashina EV, 1985b: About selection of scenarios of meteorological conditions for prediction of yields by dynamic models WEATHER-YIELD. *Collect Works ARRIAM* 10:61-73.
105. Sirotenko OD, Boiko AP, 1976: A dynamic model of agroecogenesis. *Collect Works IEM* 8(67): 12-36.
106. Sirotenko OD, Mokievsky VM, 1990: Parameterized model of water-heat regime of agroecosystem for calculation of gross evaporation in setting irrigation norms. *Collect Works ARRIAM* 26:12-21.
107. Sirotenko OD, Pavlova VN, 1988: A stochastic model of climate for calculation of productivity of agroecosystems. *Meteorol Hydrol* 7:104-114.
108. Sirotenko OD, Varcheva SE 1992: Use of climatological data in the optimisation of long-term agricultural and environmental observations and experiments. *Meteorol Hydrol* 9:97-103.
109. Sirotenko OD, Abashina EV, Pavlova VN, 1985: A dynamic model WEATHER-YIELD for spring crops and its use for assessing agrometeorological conditions in the arid zone. *Collect Works ARRIAM* 10:42-61.
110. Sirotenko OD, Slavov NS, Valkov NG, 1982: Water regime study of a dynamic maize model. *Hydrol Meteorol XXXI* (3):198, Sofia, pp 3-10.
111. Sirotenko OD, Abashina EV, Shaakmedov SA, 1987: Programming of yield using dynamic models. *J Agric Sci* 8 (369):55-59.
112. Sirotenko OD, Velichko AA, Dolgy-Trach VA, Klimanov VA 1990: Global warming and the agroclimatic resources of the Russian plain. *Izv USSR Acad Sci Ser Geogr* 6:29-38.
113. Svisyuk IV, 1971: Prediction of region-averaged yield of spring barley and spring wheat. *Meteorol Hydrol* 7:80-86.
114. Svisyuk IV, 1991: Agrometeorological predictions, calculations, justifications. Hydrometeoizdat Leningrad, 191 pp.



115. Tarko AM, Sadullaev RI 1984: A mathematical model for growth and development of cotton with allowance for nitrogenous nutrition. Comput Cent USSR Acad Sci Moscow, 38 pp.
116. Warrick RA, Gifford RM, Parry M, 1989: Carbon dioxide, climate change and agriculture. In: Bolin B, Doos Bo R, Warrick RA, The greenhouse effect, climatic change, and ecosystems. Hydrometeoizdat, Leningrad, pp 432-512.
117. Tooming H, 1970: Mathematical description of net photosynthesis: and adaptation processes in the photosynthetic apparatus of plant communities. In: Sellic I (ed), Prediction and measurement of photosynthetic productivity. PUDOC, Wageningen, pp 103-114.
118. Tooming HG, 1976: Agrometeorological programming of crop yield. Socialistic land farming 22:1017-1020.
119. Tooming HG, 1977: Solar radiation and yield formation. Hydrometeoizdat, Leningrad, 199 pp.
120. Tooming HG 1982: Method of reference yields. J Agric Sci 3 (306):89-94.
121. Tooming HG 1984: Ecological principles of maximum productivity of crops. Hydrometeoizdat, Leningrad, 264 pp.
122. Tsertsvadze SI, Meladze GG 1919: Prediction of republic-averaged yield of winter wheat. Collect Works KazNIGMI 69 (75):90-94.
123. Tupchiev VA, Nasyrov ZH, Gorbacher VA (eds), 1973: About asymptotics of solution of the diffusion coefficient for radial water flow to plant roots. Collect Works IEM 3 (40)50-56.
124. Tyukalo TN, 1980: A method for prediction of region-averaged yield of spring wheat in the Kemerovo region. Collect Works West-Siberian Hydrometeorol Res Inst 44:58-64.
125. Ulanova ES, 1963: A method for long-term prediction of agrometeorological conditions for formation of winter wheat yield. Meteorol Hydrol 11:12-30.
126. Ulanova ES, 1975: Agrometeorological conditions and yield of winter wheat. Hydrometeoizdat, Leningrad, 302 pp.
127. Ulanova ES, 1917: Methodological guidelines on compiling long-term forecasts of winter wheat yield in the main areas of cultivation of this crop. Hydrometeoizdat, Leningrad 48 pp.
128. Ulanova ES, Zabelin VN 1990: Methods of correlation and regression analysis in Agrometeorology. Hydrometeoizdat, Leningrad, 207 pp.
129. Ustinova OK, Abashina EV, Vol'vach VV, 1990: A dynamic model WEATHER.YIEID-3 for potato as a basis for the system potato - pest (disease) – habitat. Collect Works ARRIAM 25:77-83.
130. Yusupov MC 1990: A mathematical model of soil - vegetation cover complex for cotton. Author's abstract of dissertation for Candidate of Physical and Mathematical Sciences. Comput Cent USSR Acad Sci, Moscow, 22 pp.
131. Zainutdinov ZH, 1978: An addition to the methodology of prediction of regional yield of winter wheat in Tadzhikistan. Collect Works SARNIGMI 56 ( 137):60-62.
132. Zaslavsky BG, Oparina IV, Terleyev VV, 1988: A dialogue system for generating a database of hydrophysical characteristics of soils. Rep Acad Agric Sci 11:40-42.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7. ΠΡΟΓΝΩΣΗ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ

### 7.1 Αγρομετεωρολογία και καλλιέργειες

Οι μετεωρολογικοί παράγοντες όπως η θερμοκρασία, η υγρασία, η βροχή, το χιόνι, η ηλιοφάνεια, ο άνεμος είναι στενά συνδεδεμένοι με την ανάπτυξη αλλά και την ευαισθησία των φυτών. Επιπλέον εισέρχονται και στη βιολογία των εντόμων και των οργανισμών που προκαλούν ασθένειες. Ο ρόλος της Αγρομετεωρολογίας επικεντρώνεται στη μελέτη της επίδρασης του καιρού στα φυτά, στη δραστηριότητα των ζιζανίων, στην επιδημιολογία των ασθενειών και στην αύξηση των πληθυσμών των εχθρών.

Επίσης συμβάλλει σε ολοκληρωμένους μεθόδους πρόγνωσης και αντιμετώπισης των εχθρών με σκοπό την αποφυγή ή μείωση των ζημιών. Εξαιτίας της αλληλεπίδρασης φυσικών και βιολογικών συνθηκών η Αγρομετεωρολογία συνεισφέρει στην ανάπτυξη σχέσεων που συνδέουν τους κλιματολογικούς παράγοντες και τους εχθρούς των καλλιεργειών που δημιουργούν φυσιολογικές και μορφολογικές αλλαγές στα φυτά.

Είναι γνωστό ότι το κλίμα επηρεάζει την ανάπτυξη των εχθρών και ασθενειών των φυτών (σχήμα 7.1). Καθώς η γνώση της βιολογίας των εχθρών και ασθενειών των καλλιεργειών έχει βελτιωθεί, ο ρόλος του κλίματος στον βιολογικό κύκλο και τη δραστηριότητα των παθογόνων έχει γίνει καλύτερα γνωστός και έχει εκφραστεί με τη μορφή ποσοτικών σχέσεων. Παρήχθησαν ακόμα και πολύπλοκες μαθηματικές σχέσεις που επιχειρούν να δείξουν την βιολογία των παθογόνων σε σχέση με τους κλιματικούς παράγοντες.

Οι παραπάνω γνώσεις δεν είναι μόνο θεωρητικά ενδιαφέρουσες αλλά έχουν και πρακτικό ενδιαφέρον, ως προς το χρόνο αντιμετώπισης των παθογόνων έτσι ώστε να γίνουν οι εντελώς απαραίτητες εφαρμογές κατά τον κατάλληλο χρόνο.

Οι επιδράσεις του καιρού και του κλίματος στις ασθένειες των φυτών είναι περίπλοκες διότι δρουν στο φυτό, στο παθογόνο και στις μεταξύ τους σχέσεις. Ο προσανατολισμός της προστασίας των καλλιεργειών που γενικά κάνει περισσότερη χρήση των μετεωρολογικών δεδομένων είναι δράση εναντίον των επιβλαβών εντόμων και ασθενειών. Ο έλεγχος των μετεωρολογικών μεταβλητών που απαιτούνται για την αντιμετώπιση των εχθρών, απαιτούν ένα συνδυασμό των μετρήσεων τόσο στην καλλιέργεια όσο και στους μετεωρολογικούς σταθμούς.

Η ανάλυση χώρου – χρόνου ενός καλού συνοπτικού δικτύου (~50km) είναι συχνά σημαντική για τον έλεγχο του ανέμου, της υγρασίας και της θερμοκρασίας για την αντιμετώπιση των εχθρών. Εξαιρέσεις γίνονται για περιοχές με περίπλοκη τοπογραφία ή κοντά σε ακτογραμμές. Ωστόσο η φυσική ποικιλιότητα της βροχόπτωσης και κάποιες φορές η ηλιοφάνεια κατά τη διάρκεια ξηρών περιόδων, απαιτεί καλύτερες λύσεις για όλες τις περιοχές.

Τα ραντάρ και οι αυτόματοι μετεωρολογικοί σταθμοί μπορούν να παρέχουν μερικές από τις απαιτούμενες λύσεις. Η εκτίμηση στην καλλιέργεια παρέχει τις τελικές λύσεις, αλλά χρειάζεται πολύ δουλειά για την εγκατάσταση των κατάλληλων οργάνων και δικτύων.



Η εκτίμηση του κλίματος της καλλιέργειας από τα δεδομένα των μετεωρολογικών σταθμών είναι προς το παρόν εφικτή ως ένα βαθμό.

Παρακάτω αναφέρονται και πάλι οι μετεωρολογικοί παράγοντες που επηρεάζουν τις καλλιέργειες.

- **Θερμοκρασία.** Η θερμοκρασία χρησιμοποιείται σε όλα τα σχήματα αντιμετώπισης των εντόμων και των ασθενειών των φυτών που βασίζονται στα καιρικά φαινόμενα. Καθορισμένοι μετεωρολογικοί σταθμοί με δεδομένα για τη θερμοκρασία του αέρα είναι επαρκείς για σχήματα που αφορούν τα εναέρια στάδια ζωής των εντόμων και μερικά εμπειρικά παραγόμενα συστήματα αντιμετώπισης των ασθενειών.

Για τα συστήματα αντιμετώπισης των ασθενειών που παράχθηκαν από θεμελιώδεις ελεγχόμενου περιβάλλοντος μελέτες ή για σχήματα που αφορούν έντομα του εδάφους, οι συγκεκριμένοι σταθμοί δεδομένων είναι συνήθως ανεπαρκείς. Επίσης μετρημένες θερμοκρασίες στις οργανικές συνήθειες των εχθρών είναι αναγκαίες. Η μέτρηση της θερμοκρασίας των φυτών δεν είναι απαραίτητη σε κανένα γνωστό σύστημα αντιμετώπισης των εχθρών.

- **Υγρασία.** Η σχετική υγρασία ελέγχει την επιβίωση ορισμένων παθογόνων για τα φυτά οργανισμών και τα δεδομένα της σχετικής υγρασίας είναι γι' αυτό το λόγο απαραίτητα στα σχήματα ελέγχου των ασθενειών.

Τα δεδομένα της σχετικής υγρασίας που παίρνονται από την καλλιέργεια συνήθως προτιμούνται αλλά σε ορισμένες περιπτώσεις επαρκούν και τα δεδομένα από τους μετεωρολογικούς σταθμούς (π.χ. όταν ένα σχήμα παράγεται εμπειρικά από τα δεδομένα κάποιου σταθμού). Παρόλο που η διάρκεια της  $RH > 85-90\%$  έχει χρησιμοποιηθεί σαν υποκατάστατο για τη διάρκεια υγρής επιφάνειας, τα αποτελέσματα δεν αποδείχθηκαν ικανοποιητικά.

Ο χρόνος εμφάνισης και η διάρκεια της βροχόπτωσης είναι οι δύο σημαντικότερες παράμετροι στη διαχείριση των σχημάτων αντιμετώπισης ασθενειών. Το σύνολο της βροχής χρησιμοποιείται σε κάποια εμπειρικά σχήματα σαν ένας δείκτης του μήκους ή της συχνότητας των υγρών περιόδων.

Το σύνολο της κατακρήμνισης απαιτείται για τη διαχείριση των εντόμων που εξαρτώνται από την εδαφική υγρασία. Τα υψηλά εύρη βροχόπτωσης έχουν το δυναμικό να μειώσουν τους πληθυσμούς των μικρών εντόμων, αν και αυτή η πληροφορία τελευταία δεν έχει χρησιμοποιηθεί στη διαχείριση των σχημάτων αντιμετώπισης των εχθρών.

Η κατά διαστήματα ποικιλότητα της βροχόπτωσης δημιουργεί σημαντικά προβλήματα στην καθιέρωση συγκεκριμένων συστημάτων αντιμετώπισης των εχθρών. Οι μετρήσεις της διάρκειας υγρής επιφάνειας που πάρθηκαν από ένα μετεωρολογικό σταθμό γενικά δεν θα είναι επαρκείς για τη διαχείριση των ασθενειών των φυτών.

- **Άνεμος.** Οι ταχύτητες της επιφάνειας του ανέμου κοντά στην επιφάνεια είναι απαραίτητες για την αντιμετώπιση των εχθρών ώστε να μπορούμε να συμπεράνουμε τα μικροκλίματα των καλλιεργειών από τα δεδομένα των μετεωρολογικών σταθμών.



Τα δεδομένα ταχύτητας και κατεύθυνσης του ανέμου σε μήκος 3 χιλιομέτρων είναι απαραίτητα για την πρόγνωση διασποράς εντόμων και σπορίων σε μεγάλες αποστάσεις.

- **Ακτινοβολία.** Οι πληροφορίες για την ηλιακή ακτινοβολία είναι απαραίτητες για να εμποδίσουμε την επιβίωση ορισμένων σπορίων κατά τη διάρκεια περιόδων διακοπτόμενης υγρασίας. Το μήκος της νύχτας ελέγχει κάποιες φάσεις του βιολογικού κύκλου ορισμένων παθογόνων σπορίων και εντόμων και γι' αυτό το λόγο μπορεί να ρυθμίσει την ανάγκη για ελεγχόμενες μετρήσεις.

Ο έλεγχος της δραστηριότητας ορισμένων εντόμων μέσω της φωτοπεριόδου μπορεί μερικές φορές να χρησιμοποιηθεί για να ενισχύσει τα σχήματα αντιμετώπισής τους. Οι μετρήσεις της ηλιακής και της μεγάλου μήκους κύματος ακτινοβολίας ή η εκτίμησή τους από τα δεδομένα νεφοκάλυψης είναι απαραίτητη για την προέκταση από τους μετεωρολογικούς σταθμούς στην καλλιέργεια.

## 7.2 Μοντέλα πρόβλεψης εχθρών και ασθενειών των φυτών

Η γνώση μεταξύ περιβάλλοντος, φυτό και ασθένεια (σχήμα 7.2) συνεχίζει να αυξάνεται και βελτιώσεις σε βιολογικά και μετεωρολογικά δεδομένα εμφανίζονται συνεχώς. Αυτοί οι παράγοντες μαζί με τεχνικές μοντέλων επιτρέπουν την πρόβλεψη ασθενειών στα φυτά και διευκολύνουν τη καταπολέμηση των εχθρών, επιτυγχάνοντας όχι μόνο καλύτερο έλεγχο αλλά και μείωση της χρήσης των χημικών προϊόντων (Rapilly, 1980).

Διακρίσεις πρέπει να γίνουν για μεθοδολογικές και πρακτικές εφαρμογές, μεταξύ των διαφορετικών μοντέλων πρόβλεψης. Από πρακτικής άποψης, ο Touzeau (1982) έκανε διάκριση μεταξύ δύο τύπων προγνωστικών μοντέλων

α) μοντέλα των οποίων ο ρόλος είναι να προβλέπουν την επικίνδυνη περίοδο για τις καλλιέργειες και

β) ποσοτικά μοντέλα που στοχεύουν στην εκτίμηση του μεγέθους αυτών των κινδύνων.

Τα προληπτικά μοντέλα αφορούν κυρίως σε εχθρούς των οποίων η ανοχή είναι μηδενική ή σχεδόν μηδενική. Το βασικό σημείο, οικονομικά, είναι η μη μείωση των συγκομιζόμενων προϊόντων προκειμένου να ικανοποιηθούν υποχρεωτικές εμπορικές απαιτήσεις. Τέτοια μοντέλα λοιπόν αποτελούν εγγύηση για τον καλλιεργητή. Στην περίπτωση των ποσοτικών μοντέλων, προσπαθούν να προβλέψουν ξεχωριστές περιπτώσεις, υποθέτοντας την δυναμική της καλλιέργειας. Προμηθεύουν με δεδομένα έτσι ώστε ο καλλιεργητής να μπορεί να πετύχει το μέγιστο κέρδος συμπεριλαμβάνοντας το κόστος και τη σοδειά, κάνοντας δηλαδή μια σωστή διαχείριση.

Από μεθοδολογική άποψη υπάρχουν 3 τύποι μοντέλων (Rabbinge & Carter, 1983) :

A) Τα βιοφυσικά αναλυτικά μοντέλα, πολύ κατανοητά αλλά κυρίως για ερευνητικούς σκοπούς καθώς απαιτούν συνεχή προσθήκη δεδομένων.

B) Τα στατιστικά μοντέλα που βασίζονται σε γραμμική συσχέτιση αν και συχνά δίνουν πολύτιμες πληροφορίες που λαμβάνονται σε αποφάσεις

αλλά το πεδίο τους είναι περιορισμένο σε χρόνο και χώρο καθώς λειτουργούν εμπειρικά και όχι επεξηγηματικά.

Γ) Τα δυναμικά υποθετικά μοντέλα είναι αποφασιστικά και επεξεργάζονται στατιστικές μεθόδους, αλλά με περιορισμό ανάλυσης μοντέλων ανάπτυξης ασθενειών και διευκρίνησης των διαφορετικών ακολουθιών επιδημίας.

Πέρα από τα παραπάνω μοντέλα, υπάρχουν κανόνες που στοχεύουν στην πρόβλεψη μιας περιόδου μόλυνσης στα όρια παραμέτρων ή μιας συνοπτικής ανάλυσης των μετεωρολογικών καταστάσεων.

### Παραδείγματα:

Α) Ένα παράδειγμα μοντέλου προσομοίωσης για την ασθένεια του καλαμποκιού (*Cochliobolus heterostrophus*), είναι το EPIMAY (Waggoner 1972), που συσχετίζει τη θερμοκρασία, τη σχετική υγρασία και υγρασία λαμβάνοντας δεδομένα κάθε 3 ώρες. Αυτό το μοντέλο χρησιμοποιήθηκε στην Ιντιάνα (Shaner et al.)

Β) Ένα γνωστό σύστημα πρόβλεψης είναι το EIPRE (Rabbinge & Rijsdijk 1983) που χρησιμοποιείται για τον έλεγχο εχθρών και ασθενειών, σε συνεργασία με τις παρατηρήσεις των καλλιεργητών σε σχέση με τη θερμοκρασία και την ολική ακτινοβολία. Οι αρχικές ασθένειες είναι η «κίτρινη σκουριά» (*Puccinia striiformis*), το ωίδιο (*Puccinia graminis*) και η ασθένεια που προκαλείται από τον *Septoria* spp. Ένα παράδειγμα προτείνεται από τον CARS (WCP, 1984).

Γ) Ένα πιο εμπειρικό σύστημα προτείνεται από τον Castor et al. (1982) που προβλέπει τη σφοδρότητα των επιθέσεων στο καλαμπόκι από τον μύκητα *Erwinia stewartii* με τη βοήθεια δεδομένων χειμερινών θερμοκρασιών.

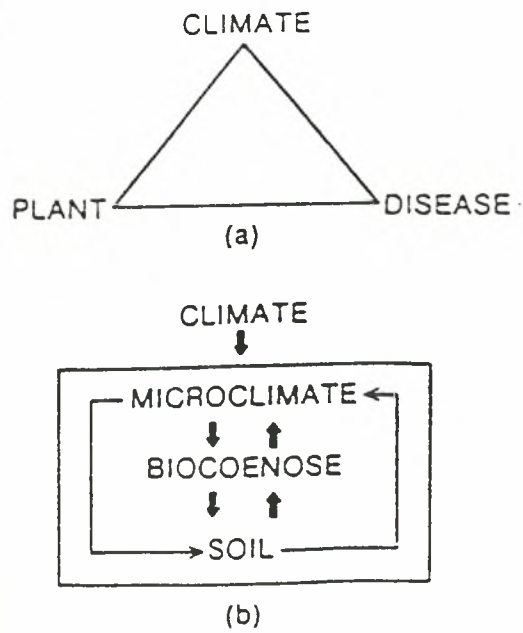
**7.2.1 CARS.** Σκοπός της μεθόδου είναι η επιθεώρηση εχθρών και ασθενειών συμπεριλαμβάνοντας τη γνώση που έχει στόχο την οικονομική προστασία των αγροτών. Η μέθοδος στην Ευρωπαϊκή Ένωση έχει τον τίτλο Επιδημική πρόβλεψη και παρεμπόδιση ενώ οι λέξεις κλειδιά για την μέθοδο είναι: έλεγχος ασθένειας, σιτάρι, ανάπτυξη εχθρών, θερμοκρασία.

Για μία ατομική βάση δεδομένων, το σύστημα προσαρμόζεται προτείνοντας στους αγρότες :

α) τη χρήση φαρμάκων σε συγκεκριμένη περίοδο εάν η απώλεια από τη προσβολή υπερβαίνει την οικονομική απώλεια,

β) να τροφοδοτήσει το σύστημα με νέες παρατηρήσεις σε μία συγκεκριμένη περίοδο, αν αυτή υπερβαίνει τις παρατηρήσεις, έτσι ώστε να προσαρμόζεται αν υπάρχει μικρή ή μη αναμενόμενη ζημιά.

Το σύστημα προβλέπει την εξέλιξη συγκεκριμένων εχθρών και ασθενειών που προκαλούνται από τους μύκητες (*Puccinia striiformis*, *P. recondita*, *Erwinia graminis*, *Septoria* spp.) και τις αφίδες των σιτηρών (*Sitobion avenae*, *Metopolophium dirhodum*, *Rhopalosiphum padi*) για ένα πρόγραμμα, η διάρκεια του οποίου εξαρτάται από τη φαινολογική ανάπτυξη της καλλιέργειας. Από τις προβλεπόμενες ανάπτυξη εχθρών και ασθενειών, υπολογίζεται η αναμενόμενη καλλιεργητική απώλεια, λαμβάνοντας υπόψη τον τύπο του παθογόνου, φαινολογικό στάδιο της επιφάνειας κάλυψης, την απουσία εχθρών και ασθενειών και αναμενόμενες καιρικές συνθήκες για την προγραμματισμένη περίοδο.



**Σχήμα 7.2** Τριγωνική έκφραση της ασθένειας

Τα εισερχόμενα δεδομένα είναι μετεωρολογικά δεδομένα όπως παρατηρούμενη θερμοκρασία αέρα και ολική ακτινοβολία, υπολογιζόμενη θερμοκρασία αέρα ( για κάθε περίοδο πρόγνωσης). Τα δεδομένα καλλιέργειας είναι η ποικιλία καλλιέργειας, η ημερομηνία σποράς, η πυκνότητα σποράς, η αναφορά από αγρότες των φαινολογικών σταδίων και τα επεισόδια διαφόρων εχθρών και ασθενειών.

Τα δεδομένα εδάφους είναι ο τύπος του εδάφους ενώ τα δεδομένα διαχείρισης είναι πληροφορίες για προηγούμενη καλλιέργεια, τη χορήγηση λιπάσματος( χρόνος και ρυθμός), καθορισμός ανάπτυξης (τύπος και χρόνος),εφαρμογή φαρμάκων (τύπος, ρυθμός και χρόνος).

Η μέθοδος βρίσκει εφαρμογή σε ένα αριθμό συστημάτων υπολογιστών ενώ η αξία της, καθώς και τα όρια της τοποθετούνται κατά την εφαρμογή. Η εφαρμογή του συστήματος εξαρτάται από την προθυμία και ικανότητα του αγρότη, να αναγνωρίζει τους πιο σπουδαίους εχθρούς και ασθένειες. Η επιτυχία μπορεί να εκτιμηθεί από τη συμμετοχή του αγρότη εφόσον πληρώνει για τη συμμετοχή.

**7.2.2 Μοντέλα ανάπτυξης ζιζανίων.** Ο Patterson μελέτησε την ανάπτυξη του (*Rottboellia exaltata* L. f.) κάτω από διαφορετικές ημερήσιες και νυχτερινές θερμοκρασίες

Σε μία συλλογική μελέτη του τα ζιζάνια *Aubtilon theophrastic* Medic. και *Anoda cristatu* (L.) Schlet. Έδειξαν να αναρρώνουν γρηγορότερα από την επίδραση χαμηλών θερμοκρασιών για 3 ημέρες από ότι το βαμβάκι. Τα αποτελέσματα βοήθησαν να εξηγηθεί γιατί αυτά τα ζιζάνια είναι ιδιαίτερος ανταγωνιστικά με το βαμβάκι.

Επίσης ο Patterson (1979) απέδειξε την επίδραση της σκιάς στην ανάπτυξη του ζιζανίου και στις φωτοσυνθετικές λειτουργίες του

Οι Orwick et al. (1978) στο πανεπιστήμιο του Purdue ανέπτυξαν ένα μοντέλο προσομοίωσης για το *Setaria viridus* var. *robusta-alba* Schreiber και το *S. viridus* var. *robusta-purpurea* Schreiber. Αυτό το μοντέλο SETSIM χρησιμοποιεί μία προσέγγιση για να παρουσιάσει την έκλυση του άνθρακα μέσα στο πληθυσμό του ζιζανίου. Το SETSIM μπορεί να προβλέψει την πιο δραστήρια περίοδο της ανάπτυξης του ζιζανίου και του χρόνου της μεγαλύτερης αντοχής του σε ζιζανιοκτόνο.

Γενικά πολλές προσπάθειες έχουν γίνει για να μοντελοποιηθούν είδη ζιζανίων. Τα ζιζάνια είναι πιο δύσκολο να μοντελοποιηθούν από ότι τα είδη των καλλιεργειών εξαιτίας της ευρείας γενετικής και φαινοτυπικής διακύμανσης που συμβαίνει στους φυσικούς πληθυσμούς. Μοντελοποιώντας ξεχωριστά ζιζάνια που αναπτύσσονται κάτω από ελεγχόμενες συνθήκες έχουν δώσει μερικές βιολογικές πληροφορίες για τα είδη αλλά δεν είναι πολύ χρήσιμα στη γεωργία εκτός αν μπορούν να προβλέψουν έκταση των πληθυσμών ή ανταγωνιστικότητα με καλλιέργεια. Μοντέλα που προβλέπουν τη φαινολογική αύξηση ζιζανίων που είναι ξενιστές εντόμων ή άλλων εχθρών χρησιμοποιούνται στην ολοκληρωμένη καταπολέμηση.

Τα παραπάνω συστήματα πρόβλεψης προορίζονται για προειδοποιήσεις. Άλλα συστήματα χρησιμοποιούν μετρήσεις στο χωράφι και ένας υπολογιστής δίνει συμβουλές. Αυτό κάνει το BLITECAST (Krause et al., 1975). Τα δεδομένα που απαιτούνται είναι οι ημερήσιες ακραίες θερμοκρασίες, ο αριθμός των ωρών που η σχετική υγρασία υπερβαίνει το 90%, η ελάχιστη θερμοκρασία σε μία περίοδο και τα ποσά υδάτινων εισροών.



Είναι ξεκάθαρο ότι τα μοντέλα, τα συστήματα ή τμήματα αυτών τα οποία εκτιμούν τους κινδύνους ασθενειών των φυτών, έχουν τεράστια αξία όταν χρησιμοποιούνται σε συμβουλευτικά προγράμματα.

Είναι αναγκαίο να κατανοηθούν λεπτομερώς οι βιολογικές συναρτήσεις ασθενειών και καιρού αν είναι επιθυμητή η ανάπτυξη σχεδίων βασισμένων σε αγρομετεωρολογικά στοιχεία. Παρ' όλα αυτά λεπτομερείς πληροφορίες είναι σπάνιες ακόμα και για σημαντικές ασθένειες στις ανεπτυγμένες χώρες. Από την άλλη μεριά, χρήσιμα σχέδια, αν και κατά το μεγαλύτερο μέρος εμπειρικά, εφαρμόζονται για τις διάφορες εφαρμογές των χημικών.

Πολλά απομένει να γίνουν ακόμα. Δυστυχώς η εμπειρία έχει δείξει ότι οι στρατηγικές που αναπτύσσονται για την προστασία των καλλιεργειών σε δεδομένα κλιματολογικά δεδομένα, δεν σχετίζονται με τα αντίστοιχα προγράμματα σε άλλες περιοχές που ισχύουν άλλα κλιματολογικά δεδομένα και η βιολογία των ασθενειών διαφέρει.

### 7.3 Ανασκόπηση μεθόδων πρόγνωσης συγκομιδής

**7.3.1 Ανάλυση χρονικής τάσεως.** Αυτή η μέθοδος βασίζεται στην στατιστική σχέση που υπάρχει μεταξύ της παραγωγής του φυτού ( απόδοση ) κατά την διάρκεια των ετών και της τεχνικής εξέλιξης που παρατηρήθηκε.

Η γενική της διατύπωση στην πιο απλή της μορφή είναι :

$$Y = a + b \{ \text{συνάρτηση χρονικής τάσης} \} + \text{σφάλμα}$$

Για παράδειγμα,  $Y = a + b \{ \text{έτος} \} + c \{ \text{έτος} \}^2$  όπου τα b και/ή c μπορεί να είναι μηδέν, θετικά ή αρνητικά.

Μια θετική τάση μπορεί να παρατηρηθεί στην περίπτωση της προόδου ή κίνητρου σε υψηλότερες αποδόσεις. Από την άλλη πλευρά μια αρνητική τάση μπορεί να εμφανισθεί στις παρακάτω περιπτώσεις

- υποβιβασμού ( οικονομίας, περιβάλλοντος, πολιτικής κατάστασης )
- μειωμένες εισροές (περιβαλλοντικές επιχειρήσεις )
- πολιτικές αποφάσεις ( εθνικές ), για παράδειγμα η εξέλιξη από την εντατική στην εκστατική γεωργία.

Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιείται από πολλές χώρες καθώς και από το Ευρωπαϊκό Γραφείο Στατιστικής (EUROSTAT).

Μερικοί από τους προβληματισμούς αυτής της μεθόδου είναι οι εξής :

- πόσο μακρές μπορεί να είναι οι χρονικές σειρές ;
- ποιά η συνέπεια μιας αλλαγής των συνθηκών ; ( για παράδειγμα μια αλλαγή στις τιμές των λιπασμάτων )
- μπορούν οι καιρικές συνθήκες να καταστείλουν, να μειώσουν ή να επαυξήσουν μια τάση ;
- πόσο αξιόπιστες είναι οι διαθέσιμες στατιστικές σειρές ;
- κατά πόσο επηρεάζουν τα πρόσφατα έτη την ανάλυση ;

Πρέπει τέλος, να θεωρηθεί ότι η τάση συχνά γίνεται επίπεδη τοπικά ή παραλλάσσει σε μια περιοχή ή υψώνεται απότομα κάπου αλλού.

**7.3.2 Ανάλυση παλινδρόμησης και στατιστικά μοντέλα.** Αυτή η μέθοδος κάνει χρήση των στατιστικών σχέσεων που υπάρχουν μεταξύ απόδοσης ( ή παραγωγής ) και των συνθηκών που μπορεί να έχουν επιδράσει στην παραγωγή ή την καλλιεργούμενη περιοχή όπως:

- παράμετροι του καιρού
- τιμές λιπασμάτων, εισροές
- Ακαθάριστο Εθνικό Προϊών
- αναμενόμενη παραγωγή

Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιείται ευρέως για παράδειγμα στην Γαλλία, σε διάφορες πολιτείες των Η.Π.Α., στον Καναδά και στην Ινδία. Η χρήση των στατιστικών σχέσεων της μεθόδου παρουσιάζει τους ακόλουθους περιορισμούς :

α) Τα αποτελέσματα μπορεί να είναι αμφίβολα ή ασταθή εάν κανένας περιορισμός δεν εμπεριέχεται στην σημασία των σχέσεων ( για παράδειγμα στο σιτάρι σε τμήματα της Γαλλίας ).

β) Μερικές από τις απαιτούμενες πληροφορίες είναι διαθέσιμες μόνο μεταγενέστερα (για παράδειγμα οι πραγματικές τιμές λιπασμάτων, ο τρέχων πληθωρισμός, εισροές χάλυβα για παραγωγή γεωργικών ελκυστήρων).

**7.3.3 Συνδυασμός χρονικής τάσεως και ανάλυσης παλινδρόμησης.** Αυτή η μέθοδος συνδυάζει μαζί την χρονική τάση και άλλες παραμέτρους σε μια απλή προσέγγιση. Οι δυο εναλλακτικές σχέσεις είναι οι παρακάτω :

- 1)  $Y = a + b \{ \text{συνάρτηση τάσης} \} + \text{Υπόλοιπο}$   
 $\text{Υπόλοιπο} = \phi \{ \text{άλλοι όροι} \}$
- 2)  $Y = a + b \{ \text{συνάρτηση τάσης} \} + c \{ \text{άλλοι όροι} \}$

Οι άλλοι όροι μπορεί να είναι

- παράμετροι του καιρού
- (αναμενόμενες) τιμές λιπασμάτων, εισροές
- Ακαθάριστο Εθνικό Προϊών
- αναμενόμενη παραγωγή

Μια ερώτηση που πρέπει να απαντηθεί όσο αφορά την συγκεκριμένη μέθοδο, είναι αν μπορούν οι άλλοι όροι να καταστείλουν, να επαυξήσουν ή να ελαττώσουν την τάση της τεχνολογίας. Η απάντηση θα μπορούσε να είναι θετική στην περίπτωση του καλαμποκιού των Η.Π.Α. και των δημητριακών της Νότιου Αφρικής. Όσο αφορά την περίπτωση των εύκρατων περιοχών, οι άλλες παράμετροι μπορεί να μην επιδράσουν στην τάση ή να επιδράσουν ελάχιστα.

**7.3.4 Προσομοίωση αύξησης των φυτών χρησιμοποιώντας απλούς δείκτες παραγωγής φυτών.** Αυτή η μέθοδος χρησιμοποιείται από τον F.A.O. την πρώην Ε.Σ.Σ.Δ. την Γαλλία (για το καλαμπόκι) καθώς και σε πολλές άλλες χώρες και διάφορες περιπτώσεις. Σε αυτή τη μέθοδο χρησιμοποιείται μια στατιστικώς έγκυρη σχέση μεταξύ των φυτών και απλών βιολογικών (ή αγρονομικών) δεικτών οι οποίοι μπορούν να συσχετισθούν με την απόδοση.

Τέτοια παραδείγματα δεικτών είναι τα παρακάτω :

- η βροχόπτωση
- το άθροισμα θερμοκρασιών

- η αναλογία βροχόπτωσης και βασικής εξατμισοδιαπνοής
- η ξηρασία ή κάποιοι δείκτες καταπόνησης από την θερμοκρασία
- <<κατασκευαζόμενοι>> δείκτες

Η προσομοίωση αύξησης των φυτών μπορεί να εκτελεσθεί με την θεώρηση ολόκληρου του κύκλου ανάπτυξης του φυτού ή τμήματα από αυτόν όπως :

- από την φύτευση έως την συγκομιδή
- από την φύτευση έως την άνθηση
- από την άνθηση έως την συγκομιδή
- πριν την φύτευση
- κατά την συγκομιδή

Οι απαιτούμενες πληροφορίες εισαγωγής, είναι οι δείκτες παραγωγής και τα εθνικά στατιστικά που αφορούν την παραγωγή των φυτών.

Οι προβλέψεις μπορούν να ενημερωθούν με περασμένα καθώς και μελλοντικά δεδομένα καιρού.

Τέλος πρέπει να επισημανθεί ο εξής περιορισμός :

Οι διάφορες στην απόδοση οι οποίες δεν εξηγούνται με τους δείκτες δεν διακρίνονται. Για παράδειγμα η απόδοση σε μια ημιάνυδρη περιοχή κατά την διάρκεια μιας ασυνήθιστης δροσερής περιόδου.

**7.3.5 Μέθοδοι προσομοίωσης της αύξησης των φυτών που βασίζονται σε προσδιοριστικά μοντέλα.** Σύμφωνα με αυτή την μέθοδο, η απόδοση των φυτών είναι απ'ευθείας ένα αποτέλεσμα ενός λεπτομερούς, προσδιοριστικού μοντέλου προσομοίωσης της αύξησης των φυτών. Κάποια παραδείγματα τέτοιων μοντέλων είναι τα WOFOST, SUCROS, ARFWHEAT...

Οι απαιτούμενες πληροφορίες που πρέπει να εισαχθούν είναι :

- δεδομένα καιρού
- παράμετροι οικοφυσιολογίας του φυτού
- πληροφορίες για το έδαφος
- πληροφορίες για την καλλιεργητική τεχνική των γεωργών ( ημερομηνία σποράς, ποικιλία, εισροές λιπασμάτων, πυκνότητα φυτών. )

Όπως συμβαίνει σε όλες τις μεθόδους, έχει και αυτή κάποια μειονεκτήματα και περιορισμούς. Μεταξύ των περιορισμών της μεθόδου μπορούν να επισημανθούν :

- η μέθοδος είναι ακριβώς καθορισμένη
- τα αποτελέσματα θα είναι ικανοποιητικά μόνο εάν όλες οι εισαγόμενες παράμετροι είναι διαθέσιμες
- οι μέθοδοι προσομοίωσης της αύξησης των φυτών με βάση κάποια προσδιοριστικά μοντέλα, είναι περισσότερο ένα εργαλείο ερευνάς ακόμη και αν μπορεί να γίνει ένα εργαλείο για να βοηθήσει στις αποφάσεις των αγροτών, ( για παράδειγμα οι ανάγκες της άρδευσης ή οι εφαρμογές των λιπασμάτων ).

**7.3.6 Συνδυασμός της προσομοίωσης της αύξησης των φυτών και της ανάλυσης της χρονικής τάσης στα μοντέλα παλινδρόμησης.** Η μέθοδος αυτή στοχεύει στο να εγκαταστήσει και να αξιοποιήσει μια στατιστική σχέση μεταξύ της παρατηρούμενης πραγματικής απόδοσης των φυτών και των αποτελεσμάτων ενός μοντέλου προσομοίωσης πιθανώς σε συνδυασμό με μια συνάρτηση χρονικής τάσης καθώς και άλλων παραμέτρων.

Τα αποτελέσματα του προσδιοριστικού μοντέλου προσομοίωσης δεν αναμένεται να είναι τίποτε άλλο παρά μια αντανάκλαση της πραγματικότητας. Αυτά τα αποτελέσματα του μοντέλου γίνονται δείκτες που χρησιμοποιούνται σαν εισαγόμενα σε μια εξίσωση παλινδρόμησης και η σχέση { προσομοιούμενο πραγματικό = πραγματική απόδοση } δεν μπορεί να είναι άλλο παρά έγκυρη.

Οι δυο πιθανές εναλλακτικές σχέσεις είναι :

$$1) Y = a + b \{ \text{συνάρτηση τάσης} \} + \text{Υπόλοιπο}$$

$$\text{Υπόλοιπο} = \varphi \{ \text{αποτελέσματα του μοντέλου} \}$$

$$2) Y = a + b \{ \text{συνάρτηση τάσης} \} + c \{ \text{αποτελέσματα του μοντέλου} \}$$

Το b μπορεί να είναι μηδέν, θετικό ή αρνητικό.

Τα αποτελέσματα του μοντέλου ποικίλουν και ανάλογα με την περίπτωση μπορεί να είναι :

- η προσομοιούμενη βιομάζα
- η προσομοιούμενη ποσότητα των σπορών
- η προσομοιούμενη φυλλική επιφάνεια
- το προσομοιούμενο στάδιο ανάπτυξης
- το προσομοιούμενο απόθεμα της εδαφικής υγρασίας
- η βροχόπτωση σε περίσσια των απαιτήσεων.

Σχετικά με αυτήν την μέθοδο θα μπορούσαν να επισημανθούν τα ακόλουθα σημεία :

- Η μέθοδος αυτή επιτρέπει να γίνουν απλοποιήσεις και γενικεύσεις στο μοντέλο, καθώς λανθασμένες υποθέσεις μπορούν μερικώς να αντισταθμιστούν στην ανάλυση παλινδρόμησης. Αυτό το γεγονός διευκολύνει την χρήση της μεθόδου σε εθνική ή τοπική κλίμακα και την εγκυρότητα της απέναντι σε εθνικά ή τοπικά στατιστικά.
- Τα αποτελέσματα εξαρτώνται παρά πολύ από την ποιότητα και την αξιοπιστία των στατιστικών που προηγουμένως αναφέρθηκαν.
- Δεν υπολογίζονται ακραίες καταστάσεις όπως για παράδειγμα σπάνιες περιπτώσεις θερμοκρασίας, υπερβολική βροχόπτωση, κ.α.
- Επίσης δεν υπολογίζονται οι ξαφνικές αλλαγές στις καλλιεργητικές τεχνικές των γεωργών.

**7.3.7 Μέθοδοι υπό ανάπτυξη – μέθοδοι τηλεπισκόπησης.** Όπως αναφέρθηκε στην εισαγωγή του κεφαλαίου οι προσδοκώμενες μέθοδοι και οι μέθοδοι υπό ανάπτυξη περιλαμβάνουν

- μεθόδους τηλεπισκόπησης
- την αεροπαλυνολογική μέθοδο
- την μέθοδο της βαθμιαίας μεταβολής του CO<sub>2</sub>.

Η αεροπαλυνολογική μέθοδος εφαρμόζεται κυρίως στην Γαλλία και είναι προ-επιχειρησιακή. Εφαρμόζεται κυρίως για προγνώσεις στην παραγωγή σταφυλιών και ελιάς. Η μέθοδος της βαθμιαίας μεταβολής του CO<sub>2</sub> βασίζεται στο γεγονός ότι οι βαθμιαίες μεταβολές του CO<sub>2</sub> και οι αλλαγές πάνω από ένα χωράφι σχετίζονται ποσοτικά με την παραγωγή των φυτών.



Το κύριο κομμάτι των μεθόδων υπό ανάπτυξη, το καταλαμβάνουν οι μέθοδοι τηλεπισκόπησης (σχήμα 7.3). Οι τρεις κύριες πιθανές προσεγγίσεις με την τηλεπισκόπηση είναι οι ακόλουθες.

**7.3.7.1 Στατιστική προσέγγιση.** Οι δείκτες που λαμβάνονται από αισθητήρες δορυφόρων ή αεροσκαφών είναι ένας μέσος όρος πάνω από μια ορισμένη περιοχή ή χώρα και εισάγονται σε μια ανάλυση παλινδρόμησης. Για παράδειγμα :

$$\text{Απόδοση} = a + b \{ \text{μέσο NDVI μιας περιοχής} \}$$

$$\text{NDVI} = \text{κανονικοποιημένος δείκτης διαφοράς της βλάστησης}$$

**7.3.7.2 Προσδιοριστική προσέγγιση.** Ένα κλασικό παράδειγμα της μεθόδου είναι το γεγονός ότι από έναν αρχικό υπολογισμό του NDVI ( κανονικοποιημένος δείκτης διαφοράς της βλάστησης ), των LAI ( δείκτης φυλλικής επιφάνειας ), APAR ( αποροφούμενη φωτοσυνθετικώς ενεργή ακτινοβολία ) καθώς και της βιομάζας, λαμβάνονται στοιχεία που οδηγούν σε εκτίμηση της παραγωγής.

**7.3.7.3 Συνδυασμένη προσέγγιση – Ενσωμάτωση των πληροφοριών τηλεπισκόπησης σε ένα μοντέλο προσομοίωσης αύξησης φυτών.** Ένα παράδειγμα είναι η εκτίμηση της πραγματικής απόδοσης συγκρίνοντας τις τωρινές συνθήκες ανάπτυξης (N.D.V.I., Ts...) οι οποίες εκτιμώνται με την τηλεπισκόπηση με αυτές των προηγούμενων ετών. Δηλαδή ο απολογισμός είναι : απόδοση του έτους  $n$  / απόδοση έτους  $n-1$ .

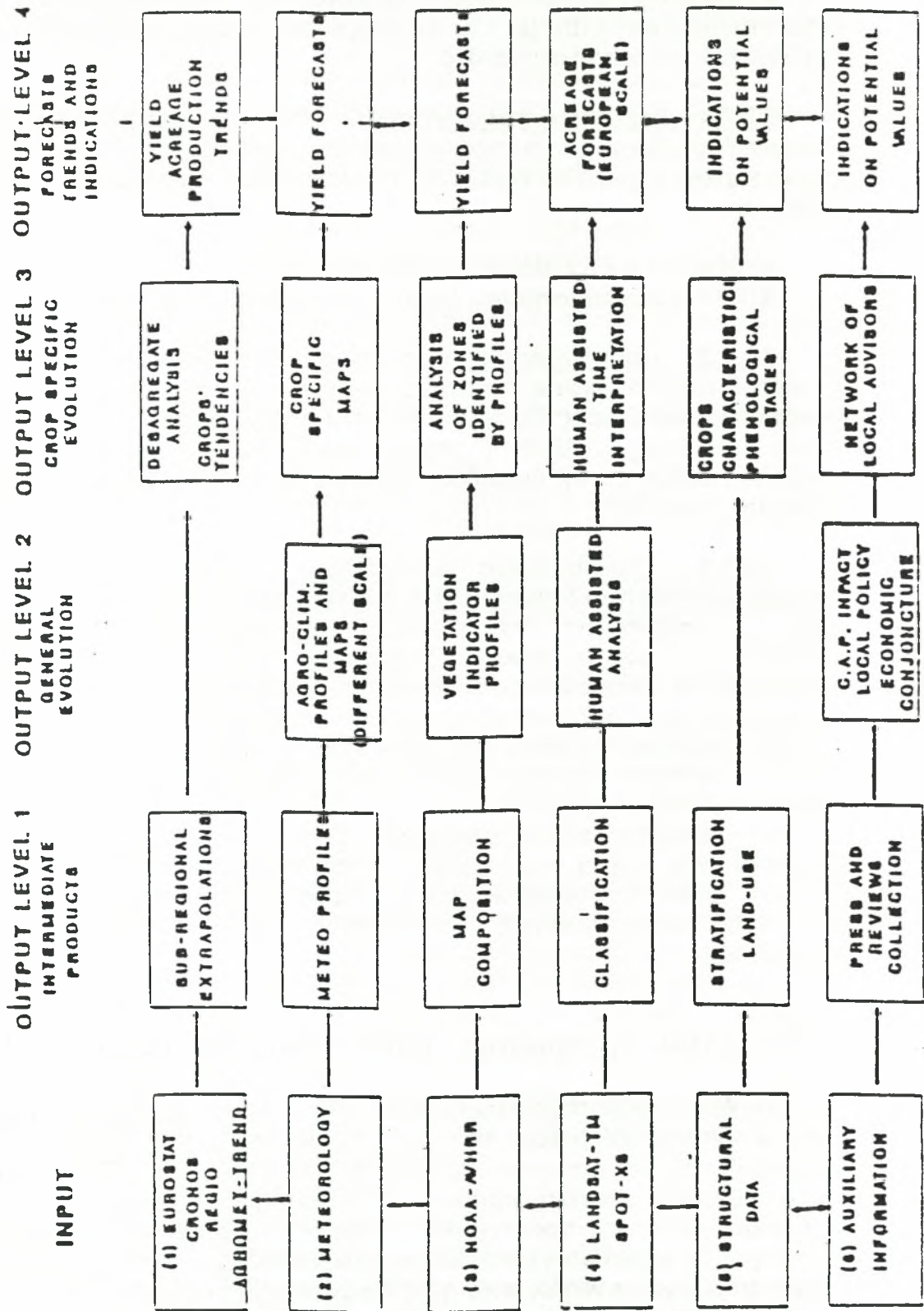
Η συνδυασμένη προσέγγιση χαρακτηρίζεται από :

- εκτίμηση της πιο πιθανής ημερομηνίας σποράς από ανάλυση δεδομένων τηλεπισκόπησης.
- ρύθμιση προσομοιούμενου δείκτη φυλλικής επιφάνειας σύμφωνα με πληροφορίες που λαμβάνονται από την τηλεπισκόπηση.
- ρύθμιση προσομοιούμενης βιομάζας που δεν έχει έλλειψη νερού, κάτω από συνθήκες καταπόνησης που εκτιμάται με την τηλεπισκόπηση.

## 7.4 Το μέλλον της προσομοίωσης φυτικής παραγωγής.

Το θέμα πρωτοπαρουσιάστηκε το 1980, με την παρουσίαση ενός πίνακα ο οποίος εκτιμούσε 18 μοντέλα με τη χρήση 23 δεικτών χρησιμοποιώντας μια εκτιμητική προσέγγιση πέντε σημείων. Εξετάζοντας διάφορα δυναμικά μοντέλα κάποιος θα παρατηρούσε τους έμφυτους περιορισμούς αυτής της προσέγγισης επειδή οι συμβατικές επιστημονικές ανακοινώσεις δε φαίνεται να μπορούν να προσφέρουν μια αντικειμενική και σε βάθος άποψη για συνθήκες ποιότητας και ανάπτυξης μοντέλου.

Η μεγάλη εφαρμογή μαθηματικών τεχνικών και Η/Υ έχει μετατρέψει τα μοντέλα αυτά σε ένα είδος φετίχ. Ένας αριθμός πρόσφατων δημοσιεύσεων έχει ασχοληθεί σχετικά με μια υπεραπλουστευμένη προσέγγιση μείωσης στην προσομοίωση των πολύπλοκων συστημάτων. Ο Nalimov (1983) αναφέρει για παράδειγμα ότι η κατασκευή μοντέλων στην οικολογία με τη βοήθεια διαφορικών εξισώσεων φαίνεται σαν παρωδία της φυσικής.



Σχήμα 7.3 Ροή εισαγόμενων και εξαγόμενων στοιχείων σε δορυφορικά συστήματα.

Αυτό είναι ίσως ένα μεγαλοποιημένο επιχείρημα, αν και το να κριτικάρει κανείς την ανάλυση των βασικών στοιχείων των οικολογικών προσομοιώσεων φαίνεται να είναι υψηλά τοπική. Η γνώμη του Nalimov είναι ότι αυτή η προσομοίωση πραγματικά συνδέεται με τις προσπάθειες διαφόρων ειδικών: έτσι ώστε μεγαλύτερης διάρκειας υπολογισμοί να συνδέονται με έναν τυπικό συνδυασμό μοντέλων. Παρά την ελπίδα μερικών συγγραφέων που στηρίζονται σ' αυτήν την σκέψη αυτή δεν μπορεί από μόνη της να καταφέρει καλύτερη κατανόηση των μελετούμενων μη γραμμικών προβλημάτων.

Η κριτική της μαθηματικής προσομοίωσης της γεωργικής παραγωγής ίσως μπορεί να ανακεφαλαιωθεί στο ότι τα περισσότερα μοντέλα που έχουν δημιουργηθεί στερούνται είτε τη γνήσια αναγκαιότητα να γίνουν ενδιαφέροντα για θεωρία είτε την εξειδικευμένη αναγκαιότητα να είναι χρήσιμα στην πράξη.

Το πολύ γνωστό απόφθεγμα του Αϊνστάιν ισχύει στην παρούσα κατάσταση: αυτό το πείραμα θα παραμείνει ένα κριτήριο της φυσικής καταλληλότητας μιας μαθηματικής κατάστασης αν και η δημιουργική αρχή ανήκει στα μαθηματικά. Έτσι ο παράγων άνθρωπος αρχικά έχει να δημιουργήσει, ανεξάρτητα, τους απαιτούμενους τύπους, πριν να είμαστε ικανοί να τους βρούμε στη φύση. Στην προσομοίωση γεωργικής παραγωγής δεν συμβαίνει συχνά τα μαθηματικά να παίζουν το ρόλο της "δημιουργικής αρχής".

Συχνά τα προτεινόμενα μοντέλα είναι μια πιο "φτωχή" τυποποίηση των ιδεών που τίθενται από βιολόγους πολύ καιρό πριν και περιγράφονται καλά στα βιβλία. Συνοψίζοντας, αυτά τα προβλήματα εμποδίζουν να δοθεί μια μοναδική θετική απάντηση στο γενικό ερώτημα που τίθεται παραπάνω.

Παρόλα αυτά, παραδείγματα μπορούν να δοθούν για το ότι η αρχή της δημιουργίας ίσως αποδίδεται σε ιδέες που προέρχονται από μαθηματικά. Το πιο εντυπωσιακό παράδειγμα είναι η αρχή της μέγιστης παραγωγικότητας των φωτοσυνθετικών συστημάτων, σύμφωνα με την οποία η προσαρμογή των φυτών στη φυτοκοινωνία επιτυγχάνεται με τη δυναμική ανταλλαγή διοξειδίου του άνθρακα κάτω από δεδομένες περιβαλλοντικές συνθήκες.

Συνεχίζοντας απ' αυτή την αρχή, ο Tooming πρότεινε την ιδέα του IDA (Irradiation Density of Adaptation) που καθορίζει τις ανταγωνιστικές αλληλεπιδράσεις στις φυτικές κοινωνίες.

Μια άλλη άποψη που ακούγεται στη συζήτηση για τη σημασία της μαθηματικής προσομοίωσης είναι η εξήγηση του φαινομένου Issyk-kul. Στην πρώην ΕΣΣΔ, κοντά στη Λίμνη Issyk-kul, 1718 μέτρα πάνω από τη θάλασσα, έχει καταγραφεί μέγιστη παραγωγή σιτηρών. Σαν αιτίες αυτού του φαινομένου αναφέρθηκαν η μεγαλύτερη φυσική ακτινοβολία και η τοπική εδαφική σύνθεση κτλ. Το 1986, η παραγωγή ανοιξιάτικου σιταριού ήταν  $8,5 \text{ t ha}^{-1}$ , όπου τα προσομοιωμένα δεδομένα παραγωγής χρησιμοποιώντας το σύστημα Φυτό-Καιρός-Μοντέλο ήταν  $7,8 \text{ t ha}^{-1}$ .

Αυτή είναι μια πολύ καλή άποψη, ειδικά όταν κάποιος παίρνει υπόψη εκ των προτέρων ότι σ' αυτή την περίπτωση των προσομοιωμένων παραγωγών ακόμη και για optimum υγρασία εδάφους και συνθήκες εφοδιασμού με θρεπτικά, η παραγωγή δεν υπερέβαινε τα  $5,5 \text{ t ha}^{-1}$ . Οι υψηλές αποδόσεις στη λίμνη Issyk-kul ίσως έτσι υπολογίζονται από καθαρά μετεωρολογικούς λόγους: ευνοϊκές θερμοκρασίες, υψηλή ηλιακή ακτινοβολία και μεγάλη περίοδο ανάπτυξης. Με το χωρίς όρια εδαφικό νερό του 1986, οι υπολογισμένες αποδόσεις αθροιζόμενες έφτασαν στα  $12 \text{ t ha}^{-1}$  που αποτελεί ένα αποτέλεσμα ρεκόρ.



## 7.6 Πειραματική υποστήριξη στην προσομοίωση

Αποτελεί κοινή πεποίθηση ότι η πειραματική υποστήριξη είναι η κύρια αιτία καθυστέρησης της λειτουργίας των δυναμικών μοντέλων. Παρόλα αυτά έχει γίνει λίγη πρόοδος σε σχέση με το πρόβλημα. Σ' αυτό το θέμα δύο επιτεύγματα που ακολουθούν φαίνεται να είναι αρκετά ενδιαφέροντα.

Ο Poluektov (1991) παρατηρεί την τρέχουσα επικρατέστερη ιδέα μιας δοκιμής στον αγρό, η τυποποίηση της οποίας επηρεάστηκε από τις μελέτες του R. Fisher και είναι μάλλον στατικά παρά δυναμικά προσανατολισμένα. Το κύριο μπλέξιμο στη μελέτη αγροοικοσυστημάτων σχετίζεται με τα χαρακτηριστικά προσαρμογής π.χ η αρχή της διαδικασίας που κάνει δυνατή την επιβίωση του φυτού κάτω από συνθήκες stress.

Έτσι ο πρωταρχικός σκοπός θα ήταν η συλλογή μιας έκδοσης μιας δοκιμής που θα ανταποκρινόταν σε ευνοϊκές συνθήκες έχοντας ως αποτέλεσμα τη μέγιστη παραγωγικότητα. Το προτεινόμενο σχήμα περιλαμβάνει εννιά τεστ αγρού με διαφορετικού συνδυασμούς stress νερού στις περιόδους αύξησης και αναπαραγωγικής ανάπτυξης και τρία επίπεδα stress αζώτου (μηδενική, χαμηλή, υψηλή). Αυτή η προσέγγιση δεν λαμβάνει υπόψη το γεγονός ότι πολλοί αβιοτικοί παράγοντες (θερμοκρασία αέρα, ηλιακή ακτινοβολία κτλ.) δεν μπορεί να είναι ελεγχόμενοι στον αγρό. Για τις περισσότερες περιπτώσεις αυτό που ισχύει είναι ένα παθητικό παρά ένα σχεδιασμένο πείραμα.

Ο Poluektov λοιπόν ότι  $X_1, X_2, \dots, X_n$  είναι μετεωρολογικοί παράγοντες που επιδρούν στις αποδόσεις  $Y$ . Οι Sirotenko και Varcheva (1992) γενίκευσαν μια νέα ιδέα

$$X = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & \dots & x_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ x_{N1} & x_{N2} & \dots & x_{Nn} \end{bmatrix}$$

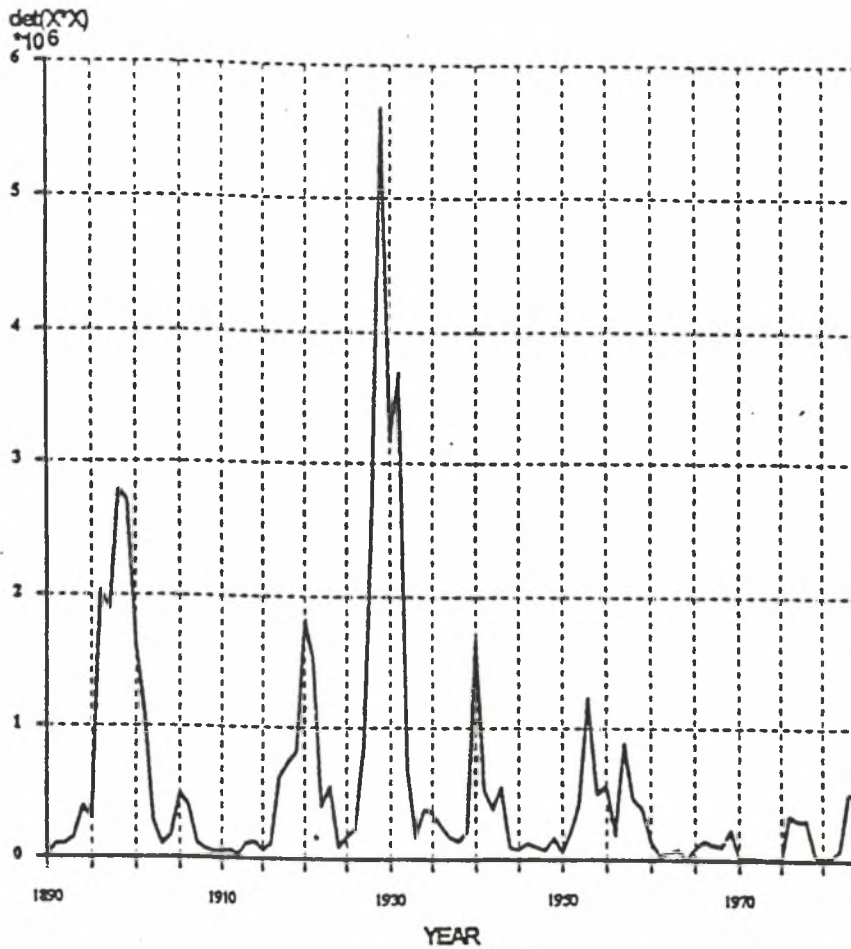
έτσι ορίζεται ένα δυναμικό σχέδιο για κάθε περιοχή της επιφάνειας της γης (όπου  $N$  είναι ο αριθμός του τρέχοντος χρόνου παρατήρησης). Ακολουθώντας τη μοντέρνα θεωρία του πειραματικού σχεδιασμού, το  $\Theta$  η ελλειψοειδής διασπορά του συντελεστή παλινδρόμησης ίσως αποδειχθεί σαν ένα αποτελεσματικό κριτήριο του σχεδίου  $X$

$$\hat{\theta} = (X^*X)^{-1}X^*Y \quad (7-1)$$

που είναι αντιστρόφως ανάλογο της καθοριστικής συμμεταβλητότητας του πίνακα  $C = (X^*X)$ . Το plan test θα είναι το καλύτερο αν ο καθοριστικός παράγων  $C$  είναι μέγιστος.

Το σχήμα 7.4 παρουσιάζει τη δυναμική του υπολογισμένου  $\det C$  (για 7-χρονης διάρκειας σχέδια) για σχεδόν 100 χρόνια. Η εικόνα δείχνει ότι η ποιότητα του χρόνου ίσως αλλάξει δραματικά αν ένα έτος προστίθεται.





**Σχήμα 7.4** Δυναμική του υπολογισμένου  $\det C$  (για 7-χρονης διάρκειας σχέδια) για σχεδόν 100 χρόνια.

Στα αποτελέσματα της προσομοίωσης ίσως περικλείεται το γεγονός ότι η επιτυχία της εξακρίβωσης των παραμέτρων, τόσο των στατικών όσο και των δυναμικών μοντέλων εξαρτάται ισχυρά από τη σύνθεση των υδρομετεωρολογικών συνθηκών σ' αυτά τα έτη που αποτελείται το δείγμα. Μάλλον συχνά, μπορεί κάποιος να βρει περιόδους για τις οποίες τα μετεωρολογικά χαρακτηριστικά  $\det C$  είναι περίπου 0, κάνοντας έτσι την εξακρίβωση των παραμέτρων αβάσιμη.

Αυτό δεν είναι μια εξήγηση ίσως, γιατί μερικά μοντέλα είναι ανεπαρκή και όχι μεγάλης ευαισθησίας ειδικά για σκοπούς πρόγνωσης παραγωγής φυτών. Η παραπάνω προσέγγιση επιτρέπει μια αντικειμενική αξιολόγηση της περιεχόμενης πληροφορίας των διαθέσιμων υλικών παρατήρησης σε έναν σχεδιαστή μοντέλου, συγκρίνοντας το διευκολυνόμενο τυχαίο σχέδιο με το D-optimum.

Επιπροσθέτως ο σχεδιαστής έχει μια ευκαιρία να υπολογίσει τους συνδυασμούς  $X_1, X_2, \dots, X_n$ , μεγιστοποιώντας έτσι το  $\det C$ , ορίζοντας τις συνθήκες  $N+1, N+2$  κτλ. να γεμίσουν τα κενά στα διαθέσιμα δεδομένα. Με άλλα λόγια η πιθανότητα του συνδυασμού ενός παθητικού πειράματος (συμβατικά test αγρού) με ένα ενεργό εργαλείο, ελέγχοντας τον εφοδιασμό του φυτού με νερό και θρεπτικά.

Η προσέγγιση που παρουσιάστηκε ίσως αποτελεί τη βάση για οπτίμηση του σχεδιασμού για γεωγραφικά πειράματα και συστήματα ελέγχου, όπου η χωρική διακύμανση του κλίματος θα προστίθονταν για κάθε διακύμανση του χρόνου.

## 7.6 Προς τα Νέας-Γενιάς Μοντέλα

Αυτό το κομμάτι συνολικά ασχολείται με την ανάλυση των τάσεων ανάπτυξης στη μαθηματική προσομοίωση της γεωργικής παραγωγής. Σ' αυτή τη φάση κρίνεται αναγκαίο να μνημονευθούν τα άλута προβλήματα που παρουσιάστηκαν. Αυτά περικλείουν :

α) το πολύ γνωστό πρόβλημα του κλεισίματος των υδροδυναμικών εξισώσεων που περιγράφουν τη διαταραγμένη κατάσταση της φυλλικής επιφάνειας,

β) το πρόβλημα της σωστής παρουσίασης της εδαφικής εξάτμισης και πρόσληψης νερού από τις ρίζες,

γ) το πρόβλημα του ορισμού εσωτερικών οριακών συνθηκών στο ολοκληρωμένο πρόβλημα ανταλλαγής ενέργειας και μάζας του περιβάλλοντος του φυτού.

Είναι ασφαλές να πει κανείς ότι βιολογικοί παράμετροι παρά φυσικοί, περιορίζουν την ανάπτυξη των μαθηματικών μοντέλων προσομοίωσης φυτών. Πρακτικά όλα τα βιολογικά προβλήματα σχετίζονται με παρουσίαση της φυτοκοινότητας σαν ένα είδος πρωτόγονου βιοχημικού παράγοντα. Η αρχή της κινητικής του μεταβολισμού εγκαταλείπεται μόνο όταν προσπαθεί κάποιος να προσομοιώσει μορφολογική ανάπτυξη του φυτού, η οποία δεν προέρχεται από την δυναμική της βιομάζας του φυτού.

Οι νόμοι της φύσης δεν ταιριάζουν σε σταθερά σχήματα, όσο πιο γρήγορος ο μεταβολικός ρυθμός, τόσο γρηγορότεροι οι ρυθμοί ανάπτυξης του φυτού. Η υπόθεση ότι όσο συντομότερα μια προσομοιωμένη συγκέντρωση

φτάνει κάποια κριτική τιμή, νέα φυτικά όργανα ξεκινούν να αναπτύσσονται ίσως είναι πιο εύκαμπτη.

Σ' αυτό το κομμάτι της εργασίας, οι μελέτες που έγιναν από Abashina και Nemchenko (1990) είναι αξιόλογου ενδιαφέροντος- πρότειναν ένα μοντέλο ορμονικής ρύθμισης της αύξησης του φυτού. Ίσως είναι πιθανό ότι υπολογισμοί λειτουργιών ορμονικής ρύθμισης στα φυτά θα προσθέσει μια βάση για πρόγραμμα οντογένεσης στα νέα μοντέλα του μέλλοντος.

Ενδιαφέρουσες προτάσεις στην αύξηση και ανάπτυξη των φυτών έγιναν από τους Kan (1989), Gulyaev (1983), Moldau (1984), Dobrachev (1982) και άλλους. Σ' αυτές τις μελέτες η χρήση της αρχής των optimum φαίνεται να υπόσχεται πολλά (η προέλευσή της πηγαιίνει ίσως πίσω στη θεωρία του Δαρβίνου για φυσική επιλογή). Έτσι, στην πράξη αυτή η αρχή έχει μόνο εφαρμοστεί για να καταγραφεί η κατάσταση μιας τοπικής ιδανικοποιημένης διαδικασίας.

Έτσι σύμφωνα με τους Tarko και Subullaev (1984), νεοσχηματιζόμενη βιομάζα διαιρείται μεταξύ των φύλλων του βαμβακόφυτου, στελεχών και ριζών έτσι ώστε η μέγιστη συχνότητα αύξησης βιομάζας θα έπρεπε να εκτιμάται στο επόμενο χρονικό βήμα, υπό τον όρο ότι δεν υπάρχουν αλλαγές στο περιβάλλον. Η optimum συμπεριφορά θα επιδρούσε, όπως φαίνεται, όχι στην έκταση της προσαρμογής τέτοιων διαδικασιών στο μοντέλο, αλλά από την τυποποίηση της υπόθεσης η οποία θα ενσωμάτωνε τους μηχανισμούς συμπεριφοράς.

Προσεχώς, φαίνεται απίθανο να προβλέψει κανείς τη μορφή των μαθηματικών δομών, στην οποία τα προγράμματα αύξησης και ανάπτυξης φυτών θα διευκολύνονται στα νέας γενιάς μοντέλα. Δίνοντας τις ευχαριστίες για τον υπολογισμό της διασκευασμένης άποψης για την αύξηση και ανάπτυξη, η συμπεριφορά του μοντέλου πρέπει να γίνει πιο πολύπλοκη και "ζωντανή" χωρίς κατ' ουσία να γίνουν πιο πολύπλοκα τα μοντέλα καθ' αυτά.

Επιπροσθέτως, σ' αυτές τις νέες προσεγγίσεις, υπάρχουν άλλες υποσχόμενες περιπτώσεις στην ανάπτυξη μοντέλων. Για παράδειγμα ο Kan (1992) έδειξε ότι η ομοιογένεια ενός πληθυσμού φυτών και η μικροοικολογία ήταν σημαντικά για την προσομοίωση γεωργικής παραγωγής. Όταν υπολογίζονταν, αυτές οι απόψεις μπορούν να κάνουν τα μοντέλα να φαίνονται στοχαστικά και θα ανοίξει νέους δρόμους στις μελέτες αγροοικοσυστημάτων.

Σχεδιάζοντας ένα ανάλογο με την ανάπτυξη μοντέρνας φυσικής, το πιο εντυπωσιακό γεγονός στην προσομοίωση φυτών πρέπει να είναι "η μεγάλη ενοποίηση" μοντέλων γονιμότητας εδάφους και παραγωγής των πιο ζωτικά σημαντικών φυτών. Αυτό έχει σαν σκοπούς :

- την καθιέρωση εφαρμόσιμων συστημάτων που συνεχώς προσομοιώνουν τη συμπεριφορά αγρονομικών συστημάτων για τόσο πολύ όσο 1-2 (ή πιο πολλές) δεκάδες μπροστά για διαφορετικά πρότυπα φυτών,

- βελτίωση γης και

- στρατηγικές χημικής εφαρμογής λαμβάνοντας υπόψη τις μελλοντικές αλλαγές στο κλίμα και τη χημική σύνθεση της ατμόσφαιρας.

Η έρευνα έχει γίνει στη βάση των ίδιων αποτελεσμάτων των αριθμητικών πειραμάτων, γινόμενη με τη βοήθεια μοντέλων ανταλλαγής ενέργειας και μάζας στο σύστημα "έδαφος-φυτό-ατμόσφαιρα". Τα μοντέλα με κατανεμημένες και συσσωρευμένες παραμέτρους συζητιούνται.

Απαιτούμενη προσοχή στη προσομοίωση δίνεται στην ανάπτυξη και ανάλυση οικονομικών αριθμητικών τεχνικών και αλγορίθμων.

## 7.7 Βιβλιογραφία Κεφαλαίου 7.

1. Abashina, EV 1979: A method to account for nitrogen nutrition of vegetation in dynamic models designed for a assessment of agrometeorological conditions for yield of cereal crops. Collect Works IEM (Institute of Experimental Meteorology) 13 (91):101-119
2. Abashina EV, Nemcnenko OA 1990: Simulation submodel for metabolism of phytohormones. Collect Works ARRIAM (All-Russian research Institute of Agricultural Meteorology) 26:53-58.
3. Boyko AP, Sirotenko OD 1985: Modelling of energy and mass exchange of soil-plant-atmosphere system under deficit of soil moisture. Collect Works ARRIAM. Hydrometeoizdat, Leningrad 10:3-26
4. Boyko AP, Safarov SG, Sirotenko OD 1990: Modeling of daily variations in total evaporation from agricultural crops. Collect Works ARRIAM 26
5. Boyko AP. 1993: Research of the hydrometeorological regime of plant environments by means of numerical methods. St. Petersburg.
6. Dobrachev YP 1982: Structure of autoregulatory model for plant growth AURORA. Dynamic modeling in agrometeorology. Hydrometeoizdat, Leningrad 17-27 pp.
7. Goudriaan J. and van Laar H.H. 1994: Modelling potential crop growth processes. Kluwer Academic Publishers, London, 238 p.
8. Gulyaev VI 1983: Photosynthesis and production process. Naukova dumka, Kiev, 14 pp.
9. Gulyaev BI, Mitrofanov BA 1983: Photosynthesis and production process. Naukova dumka, Kiev, 144 pp.
10. Kan NA 1981: System of simulation modeling of agroecosystems. In: Stolyarov AI (ed) High-intensity use of irrigated lands. Novochoerkassk South Institute of Hydrotechniques and reclamation, pp 149-154.
11. Kan NA 1989: Problem: in the methodology of simulation modelling of agroecosystems. Inst Soil Sci Photosynthi, Pushchino, 31 pp.
12. Kan NA 1992: Originogenesis and morphological structure of cereal crops in mathematical models of agroecosystems. Hydrometeoizdat St Petersburg, 133 pp.
13. Kan NA, Chuprinin VG, Sorochan KI, 1984: Mathematical support for the system of simulation modelling of agroecosystems. Novochoerkassk South Institute of Hydrotechniques and reclamation, pp 67-80.
14. Keulen H. van 1982: Crop production under semi-arid conditions, as determined by nitrogen and moisture availability. In: F.W.T. Penning de Vries and H.H. van Laar: Simulation of plant growth and crop production. Simulation Monographs, Pudoc, Wageningen,
15. Laar H.H. van, Goudriaan J., Keulen H. van (Eds) 1992: Simulation of crop growth for potential and water-limited production situations. Simulation Report. CABO-TT, 27, CABO-DLO, Wageningen, 105ñ.
16. Lemee, G., 1978: Précis d'écologie végétale. Masson, Paris: 12 pp.
17. Lomas, J., 1983: Negative disease forecasting prediction of the disease-free period of irrigated potatoes. EPPO Bull., 13: 249-253.



18. Lumsden I.A. (1980). The influence of weather on the development of winter wheat. A. Sc. Thesis, University of Bath.
19. Mah Shook Ying, 1976: Effect of *Helminthosporium maydis* infection on *Zea mays* at different stages of growth. Malay. Agric. J., 50: 394-399.
20. Moldau AA, 1973: influence of water deficit on stomatal resistance (Mathematical model). Izv Acad Sci Estonian SSR Ser Biol 22 (N4):48.
21. Moldau AA, 1977: Stomata - universal regulators of photosynthesis. *Physiol Plant* 24 (5):969-975.
22. Moldau AA, 1984: Autoregulation of production process of plants at water deficit. *Inst Plant Physiol Moscow*, 44 pp.
23. Nalimov VV, 1983: Analysis of principles of environmental forecast. *Quest Philos* 1:108-117.
24. Payen, D., Rapilly, F. and Galliot, M., 1983: Influence de la date de semis sur les potentialités climatiques de contaminations hivernales du blé tendre d'hiver par le piétin-verse en France. Paris, C.r. hebdomadaire. Seances. Acad. Agric. Fr., 69: 473-481.
25. Poluektov RA, 1991: Agroecosystem dynamics simulation. *Hydrometeoizdat Leningrad*, 312 pp.
26. Poluektov RA, et al. 1984: A basic simulation model of wheat productivity. *Wiss Z Humboldt-Univ Berl Math Naturwiss Reihe XXXIII*:339-342 pp.
27. Porter J.R. 1984: A model of canopy development in winter wheat. *Journal Agricultural Science, Camb.* 12: 383-392.
28. Primault, B., 1983: Utilisation en temps réel des relevés d'automatique suisse d'acquisition de données météorologiques dans le combat contre le mildiou de la pomme de terre. *EPPO Bull.* 13: 37-38.
29. Rabbinge, R. and Carter, N., 1983: Application of simulation model epidemiology of pests and diseases; an introductory review. development of models for practical use in crop protection, *Bulletin*: 18-30.
30. Rabbinge, R. and Rijsdijk, F.H., 1983: EPIPRE: a disease and pest modern system for winter wheat taking account of micrometeorological *EPPO Bull.*, 13: 297-305.
31. Rapilly, F., 1980: Maladies des plantes: peut-on revoir les épidémies *Recherche*, 11: 1450-1452.
32. Rapilly, F., 1982: Aspects phytosanitaires des systèmes de culture *Bulletin Technique d'Information*, 479-485.
33. Rapilly, F., 1983: Effets de quelques facteurs physiques de climat diverses séquences épidémiques. *EPPO Bull.*, 13: 63-68.
34. Rapilly, F. and Foucault, B., 1976: Premières études sur la rétention des spores fongiques par des épidermes foliaires. *Ann. Phytopathology* 31-40.
35. Rapilly, F., Laborie, Y., Echenrenner, P., Choisnel, E. and Lacré 1979: La prévision du piétin-verse sur blé d'hiver. *Pers agricoles*, 23: 30-40.
36. Sirotenko OD, 1969: Multidimensional regression analysis as a method of studying the relationship of yield of agricultural crops and hydrometeorological factors. *Meteorol Hydrol* 12:68-87 pp.
37. Sirotenko OD, 1971: Component analysis in prognostic tasks of agrometeorology. Methodological guidelines. *Hydrometeoizdat Moscow*, 53 pp.

38. Sirotenko OD, 1981: Mathematical modelling of the thermal and moisture regime and productivity of agroecosystem. Hydrometeoizdat Leningrad, 167 pp.
39. Sirotenko OD, 1984: Methods to generalise the photosynthesis theory of productivity of agroecosystems. Rep VASHNIL 10:5-8.
40. Sirotenko OD, Abashina EV, 1985a: Mathematical model for growth and development of plants at the level of phytomers. *Physiol Biochem Cult Plant* 2:166-174.
41. Sirotenko OD, Abashina EV, 1985b: About selection of scenarios of meteorological conditions for prediction of yields by dynamic models WEATHER-YIELD. *Collect Works ARRIAM* 10:61-73.
42. Sirotenko OD, Boiko AP, 1976: A dynamic model of agrocenosis. *Collect Works IEM* 8(67): 12-36.
43. Sirotenko OD, Mokievsky VM, 1990: Parameterized model of water-heat regime of agroecosystem for calculation of gross evaporation in setting irrigation norms. *Collect Works ARRIAM* 26:12-21.
44. Sirotenko OD, Pavlova VN, 1988: A stochastic model of climate for calculation of productivity of agroecosystems. *Meteorol Hydrol* 7.
45. Sirotenko OD, Varcheva SE 1992: Use of climatological data in the optimisation of long-term agricultural and environmental observations and experiments. *Meteorol Hydrol* 9:97-103.
46. Sirotenko OD, Abashina EV, Pavlova VN, 1985: A dynamic model WEATHER-YIELD for spring crops and its use for assessing agrometeorological conditions in the arid zone. *Collect Works ARRIAM* 10:42-61.
47. Sirotenko OD, Slavov NS, Valkov NG, 1982: Water regime study of a dynamic maize model. *Hydrol Meteorol XXXI* (3):198, Sofia, pp 3-10.
48. Sirotenko OD, Abashina EV, Shaakmedov SA, 1987: Programming of yield using dynamic models. *J Agric Sci* 8 (369):55-59.
49. Sirotenko OD, Velichkco AA, Dolgy-Trach VA, Klimanov VA 1990: Global warming and the agroclimatic resources of the Russian plain. *Izv USSR Acad Sci Ser Geogr* 6:29-38.
50. Tarko AM, Sadullaev RI 1984: A mathematical model for growth and development of cotton with allowance for nitrogenous nutrition. *Comput Cent USSR Acad Sci Moscow*, 38 pp.
51. Teng, N., Yuen J. 1990: Workshop on modeling pest-crop interactions. Çiçilölö, Çáuáû, January 1990. *International Benchmark Sites Network for Agrotechnology Transfer (IBSNAT)* ed., 57 pp.
52. Tooming H, 1970: Mathematical description of net photosynthesis: and adaptation processes in the photosynthetic apparatus of plant communities. In: Sellic I (ed), *Prediction and measurement of photosynthetic productivity*. PUDOC, Wageningen, pp 103-114.
53. Tooming HG, 1976: Agrometeorological programming of crop yield. *Socialistic land farming* 22:1017-1020.
54. Tooming HG, 1977: Solar radiation and yield formation. *Hydrometeoizdat, Leningrad*, 199 pp.
55. Tooming HG 1982: Method of reference yields. *J Agric Sci* 3 (306):89-94.
56. Tooming HG 1984: Ecological principles of maximum productivity of crops. *Hydrometeoizdat, Leningrad*, 264 pp.
57. Vossen p. : An overview of methods for national Crop Yield Forecasting.

58. Weir A.C., Bragg p.L., porter J.R., Rayner J.H.(1984). A winter wheat crop simulation model without water or nutrient limitations. The Journal of Agricultural Science, Cambridge 102: 371382.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

Το αντικείμενο αυτής της εργασίας είναι να παράσχει μια ανασκόπηση και μια εικόνα για το περιεχόμενο των μεθοδολογιών προσομοίωσης της πρόγνωσης της συγκομιδής. Αρκετές μέθοδοι και μοντέλα διακρίθηκαν και παρουσιάστηκαν με έναν συνθετικό τρόπο στα προηγούμενα κεφάλαια.

### 8.1 Συμπεράσματα

Η γεωργία και οι συγγενείς επιστήμες υφίστανται μια ραγδαία εξέλιξη. Τα μαθηματικά, μάλλον όντας περισσότερο ένα χρήσιμο εργαλείο για την περιγραφή αποτελεσμάτων έρευνας και την σύνδεσή τους με θεωρητικές έννοιες, υποστηρίζονται ολοένα και πιο πολύ σαν η μόνη πιθανή προσέγγιση διαφόρων προβλημάτων. Σε συνθήκες επιστημονικής μεθοδολογίας η συνήθης κατάσταση μπορεί να καθοριστεί σαν η αρχή του τελικού σταδίου με τους συνηθισμένους τρόπους επαφής της επιστημονικής έρευνας να είναι κυρίαρχοι.

Από τα προηγούμενα κεφάλαια έγινε κατανοητό ότι τρία στάδια είναι διακριτά στους τρόπους με τους οποίους περιγράφονται και εξηγούνται οι σχέσεις μεταξύ φυσικού περιβάλλοντος και γεωργικής παραγωγής. Στο πρώτο στάδιο, επικρατούν περιγραφικές προσεγγίσεις, με τις σχέσεις μεταξύ καιρού (κλιματικές συνθήκες) και γεωργικής παραγωγής να εξηγούνται στη βάση της αγρονομίας και της φυσιολογίας φυτού. Στο δεύτερο στάδιο αυτή η περιγραφική προσέγγιση αντικαταστάθηκε από μια εμπειρική στατιστική που δίνει έμφαση περισσότερο στην έρευνα για άμεση σχέση μεταξύ εισαγομένων και εξαγομένων σε ένα σύστημα μαύρου κουτιού.

Το τρίτο στάδιο στην επίλυση προβλημάτων παραγωγής-περιβάλλοντος, αφορά μια ποιοτική θεώρηση της γεωργικής παραγωγής, επιδρώντας στην αλλαγή από μια στατική σε μια δυναμική παρουσίαση των σχέσεων παραγωγής-περιβάλλοντος.

Από μεθοδολογική άποψη υπάρχουν 3 τύποι μοντέλων :

A) Τα βιοφυσικά αναλυτικά μοντέλα, πολύ κατανοητά αλλά κυρίως για ερευνητικούς σκοπούς καθώς απαιτούν συνεχή προσθήκη δεδομένων.

B) Τα στατιστικά μοντέλα που βασίζονται σε γραμμική συσχέτιση αν και συχνά δίνουν πολύτιμες πληροφορίες που λαμβάνονται σε αποφάσεις αλλά το πεδίο τους είναι περιορισμένο σε χρόνο και χώρο καθώς λειτουργούν εμπειρικά και όχι επεξηγηματικά.

Γ) Τα δυναμικά υποθετικά μοντέλα είναι αποφασιστικά και επεξεργάζονται στατιστικές μεθόδους, αλλά με περιορισμό ανάλυσης μοντέλων ανάπτυξης ασθενειών και διεκρίνωσης των διαφορετικών ακολουθιών επιδημίας.

Μελετώντας τα στοχαστικά μοντέλα εύκολα γίνεται αντιληπτό ότι τα μοντέλα αυτά αποτελούν το μέλλον της Αγρομετεωρολογικής Προσομοίωσης γιατί προς το παρόν είναι τα μόνα που προβλέπουν και μετρούν την πιθανότητα σφάλματος στα μοντέλα.



Σήμερα είναι γεγονός ότι υπάρχει πολύ μικρή ανάπτυξη και εξέλιξη μεθόδων και συστημάτων που αφορούν αυτό που ονομάζεται στοχαστική μοντελοποίηση, παρά τα όσα υπόσχεται η σύγχρονη επιστημονική τάση. Μια, σχετικά τελευταία, εφαρμογή αφορά στην χρήση ενός νευραλγικού δικτύου στην μοντελοποίηση ορισμένων διαδικασιών του αγροοικοσυστήματος.

Στα αποτελέσματα της προσομοίωσης ίσως περικλείεται το γεγονός ότι η επιτυχία της εξακρίβωσης των παραμέτρων, τόσο των στατικών όσο και των δυναμικών μοντέλων εξαρτάται ισχυρά από τη σύνθεση των υδρομετεωρολογικών συνθηκών σ' αυτά τα έτη που αποτελείται το δείγμα. Μάλλον συχνά, μπορεί κάποιος να βρει περιόδους για τις οποίες τα μετεωρολογικά χαρακτηριστικά del C είναι περίπου 0, κάνοντας έτσι την εξακρίβωση των παραμέτρων αβάσιμη.

Η πολυπλοκότητα είναι το κύριο πρόβλημα στο σχεδιασμό στατιστικών μοντέλων για το σύστημα φυτό-καιρός. Όμως αν το φυτό αντιμετωπίζεται σαν ένα ανοιχτό, αναπτυσσόμενο σύστημα - πράσινη μηχανή - που παίρνει ενέργεια και υποστρώματα απ' το περιβάλλον και παράγει οργανικές ουσίες, τότε αυτό μπορεί να παρουσιασθεί μαθηματικά με ομάδες εξισώσεων.

## 8.2 Προτάσεις

Σχεδιάζοντας ένα ανάλογο με την ανάπτυξη μοντέρνας φυσικής, το πιο εντυπωσιακό γεγονός στην προσομοίωση φυτών πρέπει να είναι "η μεγάλη ενοποίηση" μοντέλων γονιμότητας εδάφους και παραγωγής των πιο ζωτικά σημαντικών φυτών. Αυτό έχει σαν στόχους :

- -την καθιέρωση εφαρμόσιμων συστημάτων που συνεχώς προσομοιώνουν τη συμπεριφορά αγρονομικών συστημάτων για τόσο πολύ όσο 1-2 (ή πιο πολλές) δεκάδες μπροστά για διαφορετικά πρότυπα φυτών,
- -βελτίωση γης
- -στρατηγικές χημικής εφαρμογής λαμβάνοντας υπόψη τις μελλοντικές αλλαγές στο κλίμα και τη χημική σύνθεση της ατμόσφαιρας.

Η έρευνα έχει γίνει στη βάση των ίδιων αποτελεσμάτων των αριθμητικών πειραμάτων, γινόμενη με τη βοήθεια μοντέλων ανταλλαγής ενέργειας και μάζας στο σύστημα "έδαφος-φυτό-ατμόσφαιρα". Τα μοντέλα με κατανεμημένες και συσσωρευμένες παραμέτρους συζητιούνται. Απαιτούμενη προσοχή στη προσομοίωση δίνεται στην ανάπτυξη και ανάλυση οικονομικών αριθμητικών τεχνικών και αλγορίθμων.

Είναι αναγκαίο να κατανοηθούν λεπτομερώς οι βιολογικές συναρτήσεις ασθενειών και καιρού αν είναι επιθυμητή η ανάπτυξη σχεδίων βασισμένων σε αγρομετεωρολογικά στοιχεία. Παρ' όλα αυτά λεπτομερείς πληροφορίες είναι σπάνιες ακόμα και για σημαντικές ασθένειες στις ανεπτυγμένες χώρες. Από την άλλη μεριά, χρήσιμα σχέδια, αν και κατά το μεγαλύτερο μέρος εμπειρικά, εφαρμόζονται για τις διάφορες εφαρμογές των χημικών.

Πολλά απομένει να γίνουν ακόμα. Δυστυχώς η εμπειρία έχει δείξει ότι οι στρατηγικές που αναπτύσσονται για την προστασία των καλλιεργειών σε δεδομένα κλιματολογικά δεδομένα, δεν σχετίζονται με τα αντίστοιχα προγράμματα σε άλλες περιοχές που ισχύουν άλλα κλιματολογικά δεδομένα και η βιολογία των ασθενειών διαφέρει.

### 8.3 Βιβλιογραφία Κεφαλαίου 8

1. Abashina EV, Nemcnenko OA 1990: Simulation submodel for metabolism of phytohormones. Collect Works ARRIAM (All-Russian research Institute of Agricultural Meteorology) 26:53-58.
2. Boyko AP, Sirotenko OD 1985: Modelling of energy and mass exchange of soil-plant-atmosphere system under deficit of soil moisture. Collect Works ARRIAM. Hydrometeoizdat, Leningrad 10:3-26
3. Kan NA 1981: System of simulation modeling of agrocenoses. In: Stolyarov AI (ed) High-intensity use of irrigated lands. Novochoerkassk South Institute of Hydrotechniques and heclamation, pp 149-154.
4. Kan NA 1989: Problem: in the methodology of simulation modelling of agrocenoses. Inst Soil Sci Photosynthi, Pushchino, 31 pp.
5. Daus YV 1991: Development of a mathematical model for water-heat regime and productivity of lucerne or the purposes of agrometeorological provision of agriculture. Author's abstract of disseraction for Candidate of Geographic Science, OHMI-Hydrometeorol Inst Odessa, 16 pp.
6. Gulyaev VI 1983: Photosynthesis and production process. Naukova dumka, Kiev, 14 pp.
7. Gulyaev BI, Mitrofanov BA 1983: Photosynthesis and production process. Naukova dumka, Kiev, 144 pp.
8. Pavlova VN, Sirotenko OD, 1985: About use of dynamic models for assessing the effect of possible changes and climatic variations on yield of agricultural crops. Collect Works ARRIAM 10:81-90.
9. Ross YK, 1966: An addition to the mathematical! description of plant growth. Rep USSR Acad Sci 171 (N2):481-483 pp.
10. Ross YK, 1967: A system of equations for quantitative growth of plants. In: Ross YK (ed) Phytoactinometric studies of vegetation cover. Tallinn. Valgus, pp 64-88.
11. Tooming HG, 1976: Agrometeorological programming of crop yield. Socialistic land farming 22:1017-1020.
12. Tooming HG, 1977: Solar radiation and yield formation. Hydrometeoizdat, Leningrad, 199 pp.
13. Tooming HG 1982: Method of reference yields. J Agric Sci 3 (306):89-94.
14. Vossen p. : An overview of methods for national Crop Yield Forecasting.
15. Weir A.C., Bragg p.L., porter J.R., Rayner J.H.(1984). A winter wheat crop simulation model without water or nutrient limitations. The Journal of Agricultural Science, Cambridge 102: 371382.

